

氏 名 波間 智行

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1689 号

学位授与の日付 平成26年3月20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 Effects of luminance contrast on the color selectivity of
neurons in the monkey visual cortex

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 藤田 一郎 大阪大学

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

Color perception is influenced by the luminance information in various situations. The most notable example is the change in appearance of color stimulus due to the change in luminance contrast against the background. For example, when the luminance of stimulus becomes higher than the background, the appearance of achromatic color is shifted from black to white, and brown also changes to orange.

In the monkey visual cortex, color information is processed along the ventral visual pathway that originates from V1 and consists of areas V2, V4 and the inferior temporal (IT) cortex, and area V4 and IT cortex have been thought to play important roles in color perception. Several recent studies have examined the effect of luminance contrast on the color selective responses in V4 and IT but the results are divergent. Some study reported little effect of luminance contrast on the responses of color selective neurons in posterior IT cortex (PIT) and V4, but other study has found large effects in V4. One possible cause of the discrepancy is the range of colors tested: in the former study, only color stimuli with high saturation at the edge of the gamut were employed while colors with low saturation were used as well in the latter study. So far, no study has compared the effect of luminance contrast across the whole range of colors with both high and low saturation between V4 and PIT. Furthermore, there has been no study that examined the effect of luminance contrast on the color selective responses in anterior IT cortex (AIT).

In this study, I aimed to fully understand the effect of the luminance contrast on the responses of

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

color selective neurons in V4, PIT color area (PITC) and AIT color area (AITC) in a systematic way. For this purpose, I compared the responses of neurons to color stimuli with different luminance contrast using stimuli that evenly distributed across the entire color gamut of the display. While the macaque monkey was performing a fixation task, neuron activities were recorded from V4, PITC and AITC. I examined the effect of luminance contrast on the color selectivity of each neuron as well as the effect of luminance contrast on the representation of color in the population responses of neurons in each area. Two color stimulus set were used to test the color selectivity of neurons. Both color stimulus set contained 16 colors that consisted of 15 chromatic colors whose chromaticity coordinates were evenly distributed on the chromaticity diagram and one achromatic color whose chromaticity coordinate was equal to the gray background. In one set (bright set), the luminance of the stimuli (20 cd/m^2) was higher than the background (10 cd/m^2), and in the other set (dark set), the luminance of the stimuli (5 cd/m^2) was lower than the background.

To examine the effect of the luminance contrast on the color selectivity of each neuron, Pearson's correlation coefficient was calculated between the responses to stimuli in the bright set and those to stimuli in the dark set for each neuron. I found that correlation coefficient for AITC neurons was on average significantly higher than those for neurons in V4 and PITC. This indicates that the patterns of color selective responses in AITC neurons are stable to the change in the luminance contrast of stimuli than those in V4 and PITC neurons.

Next, to examine how the population responses of color selective neuron varied depending on the luminance contrast, Pearson's correlation coefficient was calculated between the responses of a

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

population of color selective neurons recorded from each area to a color stimulus in the bright set and that in the dark set with the same chromaticity. In V4, the correlation between the population responses to bright stimuli and dark stimuli was lower for cyan to blue colors and higher for magenta to red colors. In PITC, the correlation was lower for colors with low saturation around neutral color. In AITC, in contrast to V4 and PITC, the correlation was high for all colors.

These results indicate that the effect of the luminance contrast on the color representation is markedly different between V4, PITC and AITC. Of these three areas, the pattern of the effects of luminance contrast on the population responses in PITC is most similar to the effect of luminance contrast on the perceptual color appearance. This suggests that population responses of PITC neurons are closely related to the formation of color appearance. In addition, this study shows that the separation between color signal and luminance signal takes place in a stage higher than PITC.

Summary of the results of the doctoral thesis screening

刺激の輝度コントラストは我々の色知覚に大きな影響を与えることがある。たとえば、背景に比べて輝度が高いときに白色に見える色刺激は、背景に比べて輝度が低いときには黒色へと色見えが変化する。しかし、色知覚に深い関わりがあると考えられている V4 野と下側頭皮質(IT)の色選択性細胞の応答に色刺激の輝度コントラストの変化が与える影響は未だよくわかっていない。そこで本出願者は、色刺激の輝度コントラストの極性の変化が V4 野と下側頭皮質の色選択性細胞のニューロン応答にどのような影響を与えるのかを明らかにすることを目的とし、覚醒下で注視課題遂行中のマカクザルから単一細胞外電位記録法を用いてニューロン活動の記録を行い、V4 野および下側頭皮質の後部色領域(PITC)、前部色領域(AITC)の色選択性ニューロン活動を解析した。実験では 15 個の色度座標を持つ色刺激(CRT モニタの色域を均等に分割した 14 点と白色点)を、灰色背景(10 cd/m^2)より高い輝度(20 cd/m^2)(明るい色刺激セット)と低い輝度(5 cd/m^2)(暗い色刺激セット)で呈示し、それぞれに対する応答を比較した。

各ニューロンで明るい色刺激セットに対する応答と暗い色刺激セットへの応答の相関を計算したところ、V4 野と PITC では、輝度コントラストによって色選択性を変化させる細胞が AITC に比べて多く見られた。次に、色刺激の輝度コントラストの変化がニューロン集団の色応答に与える影響を調べるために、各色度座標の色刺激ごとに明るい色刺激に対するニューロン集団の応答と暗い色刺激に対するニューロン集団の応答の相関を計算した。その結果、V4 野では緑から青の色域で輝度コントラストの強い影響がみられたが、PITC では白色点やその周辺の低彩度の色刺激に対して輝度コントラストの強い影響が見られた。一方、AITC ではどの色度でも輝度コントラストの影響が少なかった。さらに、色情報と輝度コントラスト情報が色選択性ニューロン集団でどのように表現されているかをこれらの領野間で比較するため、それぞれの領野においてすべての刺激ペアについてニューロン集団の応答の距離を定量化した距離行列を作成し、この距離行列に対して多次元尺度構成法を適用して 30 個の色刺激に対するニューロン集団の色応答の類似度を、二次元平面上の点間の距離で表現した。その結果、3 領野とも色相の並びを反映する表現が見られたが、V4 野と PITC では明るい色刺激と暗い色刺激が分かれて配置されており、輝度コントラストを明瞭に表現していた。さらに PITC では白と低彩度の色において明暗刺激間の距離が他の色の距離に比べて長い傾向が見られた。一方 AITC では輝度コントラストの影響がほとんど見られず、色応答が色相の並びを忠実に反映していた。これらの結果から、PITC の神経活動が黒と白を見分ける色見えを表現するメカニズムに関与している可能性が示唆された。また、AITC の神経活動が輝度コントラストから分離された色相や彩度を表現している可能性が示唆された。

(Separate Form 3)

以上、本研究は刺激の輝度コントラストが色知覚に影響を与える神経生理学的基盤を明らかにしたものであり、私たちの視覚認知のメカニズム理解に、重要な貢献をなすものである。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。