

平成 22 年 4 月 10 日現在

研究種目：若手研究(B)
研究期間：2008～2009
課題番号：20700299
研究課題名（和文） 刺激画像の艶成分を除去し物体色を抽出する視覚神経機構の解明
研究課題名（英文） Understanding the neural mechanisms for object-color segregation from glossy surface image.

研究代表者

鯉田 孝和 (Koida Kowa)
豊橋技術科学大学・エレクトロニクス先端融合研究センター・特任准教授
研究者番号：10455222

研究成果の概要（和文）：艶と物体色の知覚過程を探るべく、ヒトを対象とした心理物理実験、サルを対象とした電気生理実験を行った。得られた成果は、色と明るさに関する新しい錯視現象の発見と、サル下側頭皮質における色情報表現についての理解の進展である。本研究の成果は、画像の取得と表示の際に経験的に行われていた処理にヒトの視覚機能による根拠を与える可能性があるとともに、視覚認知に関わる脳機能の理解に重要な役割を果たすだろう。

研究成果の概要（英文）：We sought to understand the neural mechanisms for object-color segregation from glossy surface image via human psychophysics and electrophysiological experiments of monkeys. There are two findings as follows, new visual illusion postulating unknown mechanism of color and brightness, and deep understanding of color representation of the neurons in the anterior inferotemporal cortex.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：神経科学・神経科学一般

キーワード：認知神経科学、脳、視覚、色覚、心理物理学、電気生理、サル

1. 研究開始当初の背景

(1) 心理物理実験と新しい錯視の発見

① 艶と物体色の分離に着目した理由

視覚系の機能とは、網膜に届いた光から重要な情報を引き出すことにある。経験に基づいて情報を組み合わせて、主要な情報に分離し、認知する。本研究で着目している色覚を

例にとれば、我々が認知している物体の色というのは照明光の影響を除去した結果である。照明光と物体色が分離できるように、艶と表面色も分離できるのではないかと私は予測した。

その根拠は、両者の物理起源が大きく異なっていることと、それが生体にとって異なる情報を持つこと、さらには画像中のパターン

が大きく異なるからである。艶（光沢）の物理起源は物体表面の鏡面反射であり、ミクロな凹凸（艶の広がり効く）と、マクロな曲率（艶の形状に効く）が視覚像を決定する。ミクロな凹凸は、表面のなめらかさや起毛状態などの構造を示し、マクロな曲率と併せて肌触りの違いを生み出す。物体色の物理起源は、物体内部での色素の種類と濃度である。色素とは特定の分子であり、果物の糖度や腐敗状態を強く反映する。つまり栄養なのか毒なのかといった生体に重要な情報が物体色には含まれている。さらには画像中の艶と物体色はそのパターンや強度が大きく異なる。艶は物体を回転させると出現・消滅を繰り返し、その輝度は物体色の数倍から数十倍強い。

以上から知覚の上で分離することは可能だろうと予測した。しかしヒトが物体色を分離して知覚している直接の証拠はない。まずこれを確かめる必要がある。

② 艶と色の分離を示す視覚刺激の作成

艶と物体色が分離しているかを確かめるために、艶の有無による物体色の見えの違いを実験から調べた。その結果、刺激に艶を加えても色の評価は変わらないことが分かった。しかしこの結果からは艶と物体色は分離していたとは言えない。刺激画像の中から、明るい領域を無視して、彩度の高い領域だけに空間的な注意を向けることでも、同様の結果が説明可能だからである。

この問題を解決するためには、空間的に分離しているが艶には見えない鏡面反射を持つ条件（画像）を見つけ出す必要がある。そのような画像を作る事ができれば、上記の実験から物体色の分離には艶として見えている必要があるのか確かめられる。画像の探索は、二つの方法で行った。一つめは、3Dコンピュータグラフィクスを利用した方法で、物体色（拡散反射）や艶（鏡面反射）の強度を任意に調整して画像の作成を行う。二つめは、自然画像をもとに、色や明るさのエフェクトを掛けることで画像の作成を行う方法である。以上の方法で多数の画像作成を行ったが、現時点では、上記の分離知覚問題を解決する十分な刺激画像は完成していない。今後も引き続き刺激作成を続けていく予定である。

③ 画像作成の試行錯誤の過程で偶然発見されたクリッピング錯視

鏡面反射と拡散反射を独立に色や明るさをコントロールしていたところ、新しい現象を発見した（図1）。画像中の光沢に相当する明るいピクセルに適切に色をつけることで、画像全体の明るさ感が向上する錯視である。明るさの向上はどれだけの大きさなのか、この現象は艶知覚と関係しているのか、どの

ような色や明るさの条件で生じるのかといった、錯視現象の詳細を調べることにした。

(2) 電気生理実験による下側頭皮質ニューロン活動と色知覚との関係

① 研究の背景

下側頭皮質前部は視覚情報処理の最終段階に位置し、物体認知に重要な役目を果たす領域である。この領域に損傷を与えると色弁別行動に重大な障害が発生する。さらにわれわれはこれまで、下側頭皮質前部には強く鋭い色選択性応答を示す細胞が一部に密集して存在していること、色をカテゴリー的に判断するとき活動に強いモジュレーションが掛かることを示してきた。

② 物体色の情報表現に先立つ、単純な色刺激を用いた実験

下側頭皮質前部をターゲットとして、物体色の情報表現を知るための電気生理実験を計画した。下側頭皮質前部のニューロン活動と物体色判断行動との関係性、電気刺激を与えたときの物体色認知への影響を調べることで、ニューロンと知覚との対応を知るのがその実験原理である。まずは単純な色刺激を視覚刺激として、ニューロン活動と行動との関係性を調べることにした。これまでの研究から、ニューロン活動と色弁別行動の相関性については明らかになったので（雑誌論文の③参考）、次は電気刺激の効果を確認することになった。その結果、電気刺激による効果が予想外に大きいことが分かったので、より重点的に調べることにした。これを研究期間内の目的に変更し、当初の課題である艶と物体色表現の分離に関する神経機構については次の課題として保留した。

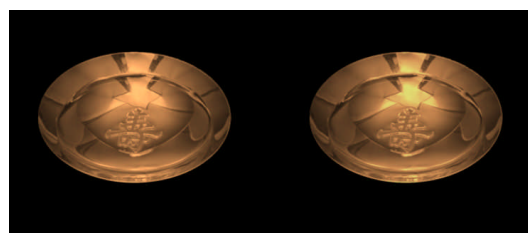


図1：クリッピング錯視の例。右の画像は明るいピクセルに黄色く色づけしてある。左の元画像と比較して明るく感じられる。

2. 研究の目的

クリッピング錯視の心理物理実験と、電気生理実験は独立に並行して行った。当初の研究予定では光沢と色知覚の関係を心理・生理の両面からアプローチするという研究計画

であった。しかしクリッピング錯視現象の心理物理実験と、下側頭皮質への電気刺激実験において、それぞれ重大な発見があったため、二つの実験を並行して進めることとした。心理・生理両面から統合する試みは今後の課題とする。それぞれのアプローチで得られた成果は比較的独立であるため、別個に節立てして紹介する。

(1) クリッピング錯視の成立条件を探る

物体画像の艶成分と物体色成分の色を独立にコントロールして刺激画像を作成していたところ興味深い現象を発見した。画像の輝度ヒストグラムは同一のまま、艶部分に特定の色をつけることによって画像の明るさ感が上昇する現象である（図1）。この錯視現象をクリッピング錯視と名付け、錯視の効果の大きさや寄与する条件を心理物理実験により明らかにすることを目的とした。

(2) 下側頭皮質の色選択的応答と色弁別行動の相関関係、電気刺激による影響を探る

物体色をコードしていると考えられる大脳皮質の高次視覚野のひとつ、下側頭皮質における色情報の表現を探るために、サルを対象とした電気生理実験を行う。研究の目的は、色選択的応答を示すニューロンの活動と色判断行動との関係を示すことにある。ニューロン活動と色判断行動の相関関係を示すこと、電気刺激によってニューロン活動を強制的に起こしたときの色判断への影響から因果関係も含めたテストを行い、ニューロンの重要性を定量的に確かめる。

3. 研究の方法

(1) 心理物理実験による錯視の調査

錯視効果の大きさを定量化するためにマッチング実験を行った。画像に色を加えることで明るく知覚されるようになった画像（図1右）に対して、被験者は色変化を加えない元の画像（図1左）の輝度を調整することで見えの明るさ感をマッチさせる。予備実験により、効果的な条件の一例が確かめられている。それはオレンジ色の単一色度のグレースケール画像を用意し、輝度の高い上位10%程度のピクセルに対して、色度を黄色方向にずらすことで得られる。ピクセルの輝度は変化させない（図2）。

実験により確かめるのは、以下の三つである。効果を生じさせるために画像にはどのような空間的パターンが必要なのか、色づける量や色相の方向によって効果は増減するのか、元の画像の色度と効果を起こす色相変化方向との関係性はあるのか。以上の結果を踏

まえて、錯視現象を生じさせるメカニズムについて考察する。

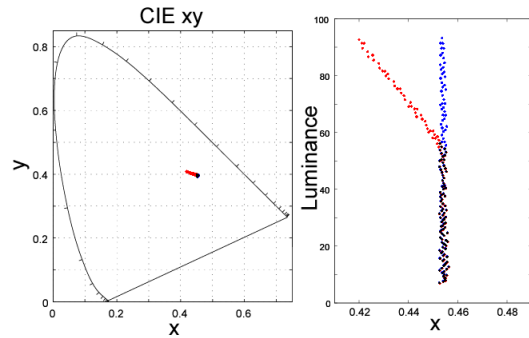


図2：クリッピング錯視を起こす刺激条件例。画像の色度と輝度を散布図で示す。左は色度平面、右は色度と輝度の面である。赤点が錯視の画像、青点が元画像の分布を表す。

(2) サル下側頭皮質の電気生理実験

色の違いを見分けているときに、電気刺激を与えると色判断に影響が生じるのかを調べる。サルは色を見て判断する課題を行う（図3）。CIE-xy色度図上で直線上に並ぶ7つの色刺激を一つのセットとし、7つの色から一つランダムに選ばれ呈示された色が1番側に近いか7番側に近いかをサルは学習し答える。課題を正しくこなすと、図3下に示したようなS字型の判断行動が得られる。

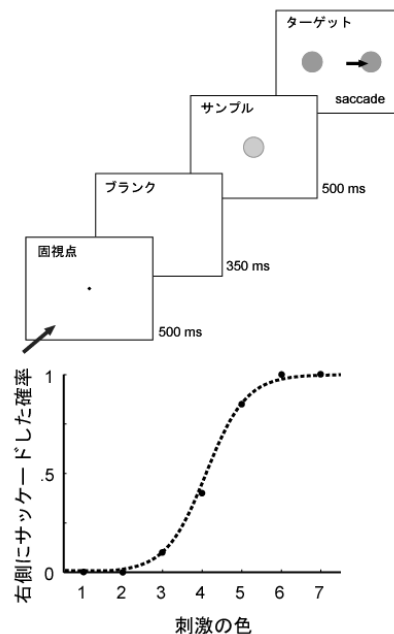


図3：色判断タスクの概略図と行動結果の例。

電気刺激は、色刺激の提示と同じタイミングで皮質領域に微弱なパルス電流(Biphasic, 200Hz, 20 μ A)を流す。電気刺激を与えないときと比較して、色判断行動にどのような変化が生じるか調べる。さらに、下側頭皮質のどの場所を電気刺激したときに効果が生じるのか、色判断への影響は色空間上でどの方向性を持つのか、電極近傍の細胞の色選択的応答とどのような対応関係にあるのかを明らかにする。色選択的応答と効果の方向に対応関係があれば、ニューロンが色判断行動に因果関係を持つことを示したことになる。

4. 研究成果

(1) クリッピング錯視を生じさせる刺激条件

① 成果のまとめ

クリッピング錯視によって30%以上の輝度上昇に相当する明るさ感の向上が起きたことがわかった。重要な条件は色づける色相の方向であり、赤オレンジ領域では黄色方向(図4上)、緑領域では黄色方向、青領域では白方向であった。この色変化方向はこれまで知られている色の鮮やかさによる明るさ向上(ヘルムホルツ・コールラウシュ効果)とは逆向きであり、新しい現象であると言える。

また、この現象は光沢を持った物体画像を対象としなくとも風景写真や物体画像であっても生じていた。さらにサイン波の縞模様やガウシアンといった実験室条件的な画像であっても安定して生じていた(図4下)。ただし、中心周辺型の二色刺激や、写真をピクセルシャッフルした画像では効果的に生じなかった。様々な画像で生じることから、クリッピング錯視は光沢や表面色といった高次認知による分離を想定せずとも、視覚系の単純な処理で錯視現象が説明できる可能性がある。またこの現象は照明光や表面反射率の推定では説明ができない。考えられるメカニズムとして、錐体などの出力の飽和を補正する脳の機能が挙げられる。

一般にセンサーに入力する刺激が強すぎると、その出力は飽和しそれ以上上がりにくくなる現象がある。カメラであれば白飛び、あるいは色ずれとなる。同様の現象は視覚系でも起きており、色度を一定のまま輝度を上げると、色の見えはおおよそ錐体出力の飽和と似た色相のずれを生じることが知られている(ベズルト-ブリュッケ色相変化)。出力飽和は視覚系のセンサーとしては避けられない特性であり、光源や光沢のように極めて明るい対象の近傍では、例えば空間的にオレンジから黄色、そして白へと変化することを常に経験していることになる。

ここで、刺激の明るさによって色相が変化

する現象と逆の情報処理を考える。上記の色相変化が輝度上昇と相関して空間的に連続的に生じているときは、刺激の色が変化したのではなく、色が一定で明るい刺激が入力されたのだろう、と入力光強度を推定した方が外界刺激を正確に記述する可能性が高い。これはまさにクリッピング錯視の色・輝度パターンと一致している。この仮説をもとに色の変化量から明るさの向上量を予測すると、実験結果と定量的に一致することが分かった。

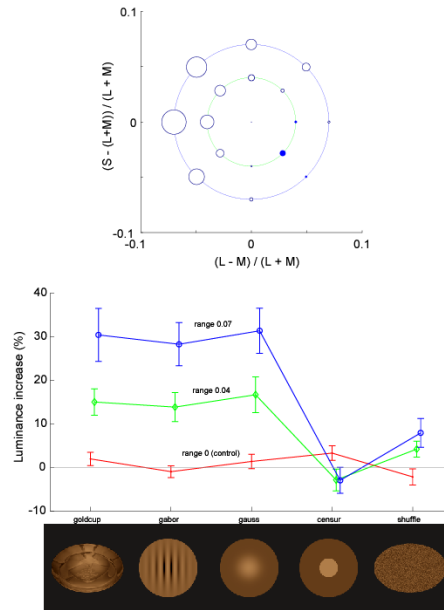


図4: クリッピング錯視の効果。(上) 色づける色相方向による効果。元画像の色度(オレンジ色)を原点にとり、色づける方向を錐体色空間で8方向、距離を2段階にとって測定を行った。効果の大きさを丸の大きさで示す。図の左上方向、黄色から白色方向に変化させたときに大きな効果が生じている。(下) 刺激画像の種類による効果。色づけ量として最適色方向に二段階(青丸と緑ダイヤ)色づけ無し(赤点)を用いた。自然画像、縞模様、ガウシアンでは強い効果が同等に生じるのに対して、中心周辺型の二色、ピクセルシャッフルでは効果が生じないか弱かった。

② 成果の国内外における位置づけとインパクト

このようなダイナミックレンジによる制限と推定は、視覚系のみならずセンサーやシグナル伝達一般のあらゆるところに適用可能なため、学際的に大きなインパクトを与える可能性がある。さらに、写真撮影や印刷といった応用面にも役立つだろう。画像撮影や印刷時には、画像全体を明るくする代わりに白飛びを許容するか、全体を暗くする代わり

に広い表現レンジの正確さを取るか、といったトレードオフがつねにつきまとう。これまで、経験頼りで行ってきたと考えられるカメラや印刷物の感度調整であるが、本研究によって明確な理由付けができるようになる。画素値飽和した場合にはどのような色・明るさの変化を生じさせるのが最適であるのか、最適な条件を用いることで原理的には表現できない、明るいハイダイナミックレンジな画像の印象を観察者に与えることも可能かもしれない。

(2) 下側頭皮質の色応答ニューロンと色判断の関係

① 成果のまとめ

下側頭皮質に電気刺激を与えると色判断に大きな変動が生じることが分かった(図5)。大きな効果が生じるのは下側頭皮質のごく一部を刺激したときであり、それは前中側頭溝の後端近傍に数 mm 程度の広がりを持った領域であった。同時記録した実験から、この領域のニューロンは強く鋭い色選択性を持っていることが明らかになった。電気刺激の効果は色判断のシフトとして観測されたことから、電気刺激はノイズではなく色シグナルを与えていたと考えられる。シフトの方向は色空間上で明らかな傾向を持っていた。さらに、刺激部位に存在するニューロンの色選択性と一定の対応関係が見られた。以上の結果から、下側頭皮質と色知覚の因果関係を含む重要性を示した点で成果があったと言える。

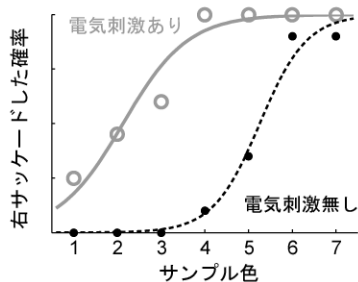


図5：電気刺激による色判断への影響例。

② 成果の国内外における位置づけとインパクト

関連実験の結果は、ニューロンがもつ刺激選択的応答が、どれだけ知覚と対応しているのかを定量的に記述したものである。同様の定量的記述は、視覚系の他のモダリティ、運動方向や奥行き判断、運動速度などでも求められてきた。本研究の成果は、感覚情報の表現を横断的に定量比較するための基礎的データとなるだろう。

大きなインパクトは、電気刺激の効果が非

常に大きい点にある。これまで電気刺激による判断への影響は運動方向、奥行き、速度知覚などで求められてきたが、MT野への電気刺激で大きい効果が生じるのは、同一の刺激選択特性をもつニューロンが密集しているからと考えられてきた。しかし、下側頭皮質前部には明確な色ニューロンコラムやクラスターが知られていない。それにも関わらず大きな効果が生じたことは驚きである。下側頭皮質は物体認知に関わる領域であるにもかかわらず、これまでサルを対象とした厳密な知覚実験やマッピングを行ったものは数が少ない。その理由は、下側頭皮質が機能によってパッチ状に分化しているという構造が最近になって分かってきたからである。今後は、本研究と同様の手法(相関性の測定と電気刺激による影響)を用いて、下側頭皮質の様々な機能的パッチとの対応関係を調べる研究が行われていくだろうと予想される。

本研究に貢献した研究者について

クリッピング錯視についての心理物理実験は、小松英彦教授(生理学研究所)の指導の下、岡澤剛起(総合研究大学院生)との共同で行った。下側頭皮質のニューロン活動記録は、小松英彦教授(生理学研究所)の指導の下、松茂良岳広(総合研究大学院生、当時)が主体となって共同研究を行った。電気刺激実験は小松英彦教授(生理学研究所)の指導の下、鯉田孝和(代表者)が主体となって研究を行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① 鯉田孝和、色覚中枢の場所と情報表現：下側頭皮質と色のカテゴリー性、日本視覚学会学会誌 VISION、査読無、22 巻、2010、pp. 41-48.
- ② Goda N, Koida K, Komatsu H, Colour Representation in Lateral Geniculate Nucleus and Natural Colour Distributions, Computational Color Imaging LNCS、査読有、5646 巻、2009、pp. 23-30.
- ③ Matsumora T, Koida K and Komatsu H, Relationship between color discrimination and neural responses in the inferior temporal cortex of the monkey, Journal of Neurophysiology, 査読有、100 巻、2008, pp. 3361-3374.

[学会発表] (計17件)

- ① Koida K and Komatsu H, Effects of

electrical microstimulation of the inferior temporal cortex of the monkey in color perception, 第 32 回日本神経科学大会、2009 年 9 月 16 日、名古屋

- ② Koida K and Komatsu H, Microstimulation of monkey inferior temporal cortex induces change in perceptual color judgement, XXXVI th International Union of Physiological Sciences (IUPS)、2009 年 7 月 27 日、京都
- ③ 鯉田孝和、岡澤剛起、小松英彦、クリッピン 錯視：色変化による見かけの明るさ向上錯視の発見、日本視覚学会夏季大会、2009 年 7 月 22 日、京都

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

(1)アウトリーチ活動 1（市民講座）

鯉田孝和、みんなで実験！—錯視の不思議な世界—、2010 年 1 月 30 日、岡崎市げんき館
<http://www.nips.ac.jp/nipsquare/lecture/entry/2010/01/post-3.html>

(2)アウトリーチ活動 2（サイエンスイラストによる研究広報活動）

<http://www.nips.ac.jp/~koida/illustr/>
イラストを用いて web および印刷媒体での研究広報を行った。さらに、イラスト展示出版（サイエンスアゴラ、2009 年 11 月 1 日、日本科学未来館、東京）イラストを用いたコ

ミュニケーションについてのシンポジウム（身体の中のにぎやかな世界、2009 年 11 月 28 日、日本科学未来館、東京）を行った。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

豊橋技術科学大学・エレクトロクス先端融合研究センター・特任准教授

鯉田 孝和 (KOIDA KOWA)

研究者番号：1 0 4 5 5 2 2 2

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし