

平成27年9月29日

報道機関 各位

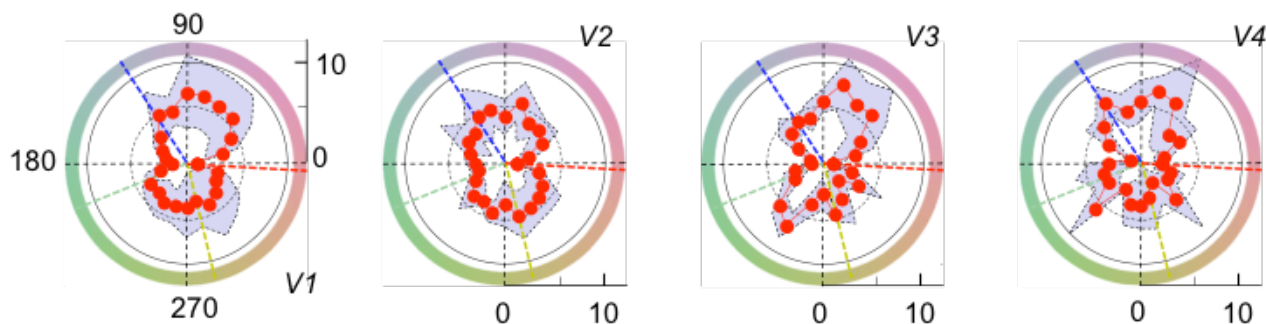
東北大学電気通信研究所

## 人間の視覚野に中間色を扱う細胞が存在 - 脳機能計測により解明 -

### 【概要】

東北大学電気通信研究所の 栗木一郎 准教授と、理化学研究所脳科学総合研究センター（埼玉県，和光市）の研究グループは、人間の脳内で中間色に反応する神経細胞が存在する事を fMRI による脳活動計測を用いて明らかにする事に成功しました。

本研究は、映像情報ディスプレイやプロジェクタの多原色化・高ダイナミックレンジ化において、人間に適した原色の選択や多階調化の指針に影響を与える成果であると考えられます。



【図】第1～第4次視覚野(V1～V4)において、中間色を含む多様な色に反応する fMRI 画像の画素ヒストグラム. 赤シンボルが全平均値. リングの色はその方位の色を示している. 中心から離れているほど、その方位の色に選択的な画素の存在比率が高い.

### 【詳細な説明】

2枚目以降をご参照ください。

問い合わせ先

東北大学電気通信研究所

担当 栗木一郎

電話 022-217-5470, 022-217-5469

E-mail ikuriki@riec.tohoku.ac.jp

## 【概要詳細】

東北大学電気通信研究所の栗木一郎（くりき いちろう）准教授と、理化学研究所脳科学総合研究センターの田中啓治（たなか けいじ）チームリーダー、程 康（ちえん かん）ユニットリーダー、上野賢一（うえの けんいち）研究員、孫 沛（すん ぺい）研究員（現・清華大学 准教授）の研究グループは、人間の脳内で中間色に反応する神経細胞が存在する事を脳活動計測により明らかにする事に成功しました。

色は視覚の中でも基本的な情報の1つで、物体の認識・識別に重要な役割を果たします。従来、色見え方に関する神経信号は4つの反対色またはユニーク色の「赤／緑、青／黄」の組み合わせで表現されていると考えられていましたが、近年の霊長類における色覚研究では、反対色／ユニーク色の中間に当る色（紫、橙、シアン、黄緑など：中間色）に選択的な神経細胞の存在が指摘されています。人間の脳の中に「どの色に対して選択的な神経細胞（色選択性）が、どの程度の比率で存在するか（存在比率）」は、明らかにされていませんでした。

本研究グループは、連続的に色に変化する図形を呈示し、その間の被験者の脳活動を高静磁場強度（4テスラ）のMRI装置を用いてfMRI（functional MRI）測定する事により、色選択性と存在比率を調べました。もしも4つの原色の組み合わせで色に関する全ての情報が表現されているならば、4つの反対色／ユニーク色（赤、緑、青、黄）に対してのみ強い神経活動が測定される事が予想されます。しかし、本研究グループは、反対色／ユニーク色の中間色（紫、橙、シアン、黄緑など）に対し強い選択性を示す応答をも測定する事に成功しました。さらに、中間色に対する脳活動が反対色に対する応答の組み合わせではない事を示す証拠として、1つの中間色を30秒ほど連続して観察（順応）すると、順応色に対する脳活動のみが選択的に低下する事を、fMRIにより測定しました。これらの結果は、人の脳内には中間色に対して反対色／ユニーク色より強い選択性を示す細胞が存在する事を示しています。

本研究の成果により、脳の中で視覚情報がどのように表現され情報処理が進んでいるかに対する理解が大きく進展し、映像情報を表示するデバイスの効率化や高性能化に大きく貢献する事が予想されます。

この研究成果は2015年9月30日、午前9:00（英国時間；日本時間 午後5:00）に発行される脳科学研究に関する国際的論文誌「Cerebral Cortex」（電子版）に掲載されます。本論文はフリーアクセスであり、論文誌のwebページ（<http://cercor.oxfordjournals.org/>）にて誰でも閲覧する事ができます。

【論文詳細】

題名 : Hue Selectivity in Human Visual Cortex Revealed by Functional Magnetic Imaging

著者 : Ichiro Kuriki, Pei Sun, Kenichi Ueno, Keiji Tanaka, and Kang Cheng

掲載誌 : Cerebral Cortex (Oxford University Press; IF = 8.305)

【本件連絡先】

東北大学 電気通信研究所 人間情報システム研究部門 知覚脳機能研究分野

栗木一郎 准教授

e-mail: [ikuriki@riec.tohoku.ac.jp](mailto:ikuriki@riec.tohoku.ac.jp)

理化学研究所 脳科学総合研究センター

研究基盤センター 機能的磁気共鳴画像測定支援ユニット

程 康 ユニットリーダー

e-mail: [kcheng@postman.riken.jp](mailto:kcheng@postman.riken.jp)

## 【研究の背景】

脳内に存在し視覚情報を処理する神経細胞の特性に合わせた視覚情報を表示できれば、脳が受け入れ易い形で情報を与えることができます。従って、脳内でどのような神経細胞が視覚情報を伝達／処理しているかを明らかにする研究は、有効な情報表示のためのヒューマンインターフェイスに関する基盤研究として重要な意義をもっています。

霊長類の色覚は、果実の成熟度の判別を行なう事に適応して進化したという説が存在するように、色彩は人間が物体の判別などを行なう際に非常に重要な手掛かりとなります。一方、人間が識別可能な色は数万種類と言われてはいますが、これら全てを脳内にある有限個の神経細胞で表現するには、要素となる信号の組み合わせを用いる必要があります。従来の学説では、色の信号に関連する神経細胞は4つの反対色（図1の縦軸・横軸方向の色）またはユニーク色「赤／緑、青／黄」、そして明暗（光の強さ）に対して選択的な神経細胞の応答の組み合わせにより、色情報が表現されていると考えられてきました。

本研究では、脳内の特に視覚情報を扱う初期の段階である第1～第4次視覚野において、色情報を専門的に扱う神経細胞の特性について、「どの色に最大の感度を持つ神経細胞（色選択性）が、どの程度の比率で存在する（存在比率）か」について調べる事を主目的としました。

## 【方法】

本研究グループでは以前、心理物理学的研究（Kuriki, 2007）および脳活動のデコーディング研究によって（Kuriki et al., 2011）、中間色を表現する細胞の存在を「間接的に」示す事に成功していました。しかし、デコーディングでは、予め設定された比較的少数（通常8つ以下）の検査色以外に対して感度をもつ細胞の有無を網羅的に調べる事ができず、脳の神経細胞の色選択性とその存在比率を明らかにする事ができません。そこで、本研究では、連続的に色が変化する視覚刺激を呈示し、脳機能計測データ（画像）の各点について色選択性を調べ、そのヒストグラムを作成しました。

具体的には、一定の速度で色を連続的（赤→紫→青→緑→黄→橙→赤→…の順）に変化させ（図1）、脳活動を示す BOLD (Blood Oxygenation Level Dependent) 信号の時間変化を記録しました。fMRI によって取得された脳画像の各画素について信号の時間変化を解析し（図2）、どの色が表示された時に最大の応答を示したかを解析しました（図3A）。解析の方法として、差分脳活動法（differential hemodynamic response method: dHDR 法）を用いました（図3B）。この方法を用いると、求めたい刺激特徴の変化（本研究では色）と関係ない脳活動の成分（視覚刺激の出現／消去に対応した脳活動変化、等）を除去し、高い S/N 比で刺激特徴の変化に対する選択性を調べる事ができます。

さらに、中間色に対する脳活動が、反対色メカニズムに対する神経活動の足し合わせによる信号ではない事を示すため、ある中間色に一定時間（～30 秒）順応した後で、順応した色に対して脳活動が低下する事を調べる実験を行ないました。この実験では、順応色以外に対する応答が影響を受けない事が示され、dHDR 法で求めた中間色に対する神経細胞の応答が、反対色メカニズムの神経活動の足し合わせによる信号ではない事を実証しました。

### 【成果の内容】

本研究は、人間を被験者とした研究では初めて、中間色に対して選択的に応答する細胞の存在だけではなく、具体的な色選択性およびその存在比率（ヒストグラム）を明らかにする事に成功しました。

図4は、色変化を順方向／逆方向に変化させて記録した脳活動を2回ずつ記録したときの各々のヒストグラム（青と緑の細い線）および総平均（赤シンボル）を、代表的な被験者1名について示しています。複数回の計測において安定した応答が取得できている事を示しています。

図5は、全被験者のヒストグラムの平均値を方位ヒストグラムで示したものです。特に第1次視覚野（V1）において、色選択性を示したボクセル（画素）の存在比率に大きな偏りがある事を示しています。色選択性細胞の存在比率の偏りは、マカクサルにおける電気生理学的な研究結果において報告されているものと矛盾しません。この偏りは第4次視覚野（V4）においては軽減される傾向が見られます。この図の縦軸・横軸は反対色、放射状に伸びた4色の点線はユニーク色を示しています。

### 【研究の意義】

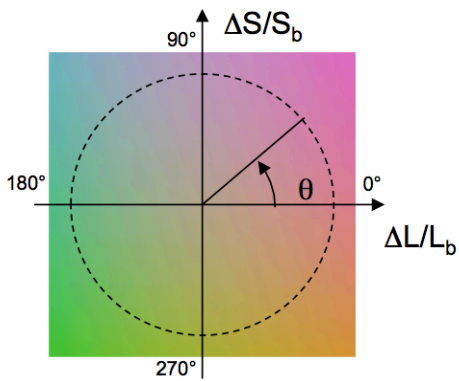
本研究論文は、人間の視覚情報処理の生理学的な過程を明らかにするだけでなく、情報ディスプレイの設計においても指針を示す重要な成果であると考えられます。

本研究は、脳内において色を専門に扱う神経細胞には、中間色に対して選択的に反応する細胞が多く存在する事を示しました。この結果は、脳は4つの反対色／ユニーク色（赤／緑、青／黄）のみならず、多様な中間色を個別の信号として扱う事ができる事を示しています。この結果は、脳がとらえやすい色の情報の与え方について有意義な示唆をあたえる成果であると考えられます。

また、より豊かな色彩や質感の感覚を引き起こすには、映像情報ディスプレイの多原色化・高ダイナミックレンジ化が重要である事を示唆しています。ヒストグラム（図4、図5）において存在比率の高い色彩の付近では、微細な色彩の違いを評価する能力が高い可能性を示しています。空間解像度の向上だけでなく繊細な色彩の表示が重要であり、色選択性細胞の存在比率は映像情報ディスプレイの多原色化・高ダイナミックレンジ化における設計指針の参考になる情報だと考えられます。

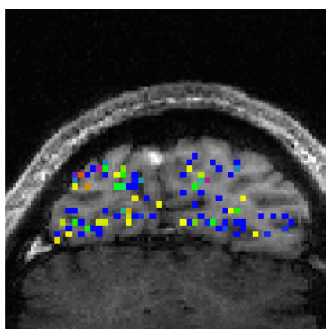
【説明図】

図 1. 色平面（輝度一定）



色は円軌跡上を一定速度で変化.

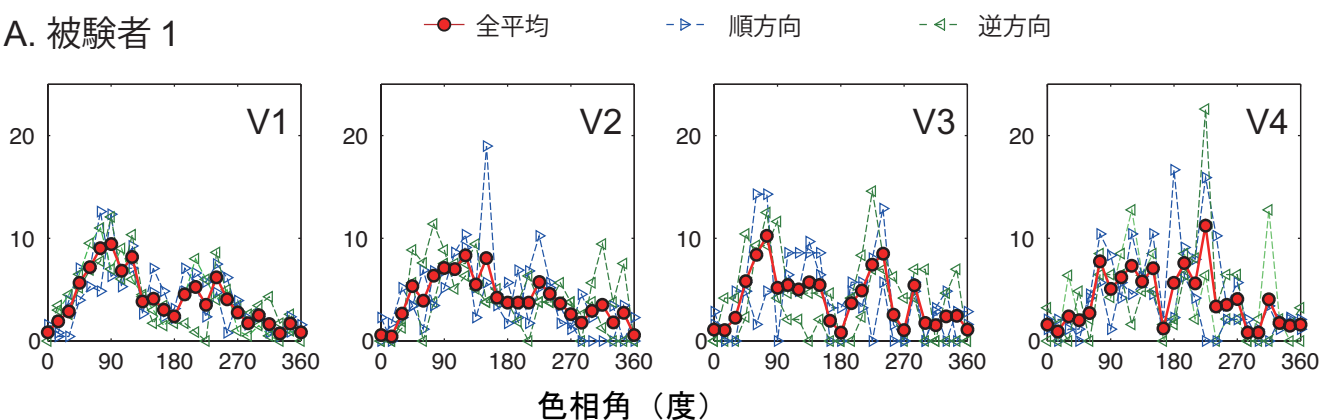
図 2. 色選択性マップ（脳画像）



画素ごとの色選択性分布の例.

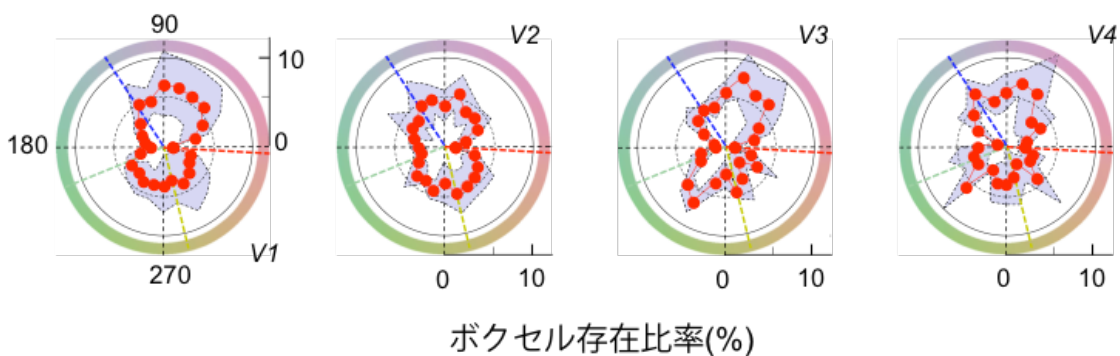
図 4. ヒストグラム（折れ線；代表的被験者の例）

A. 被験者 1



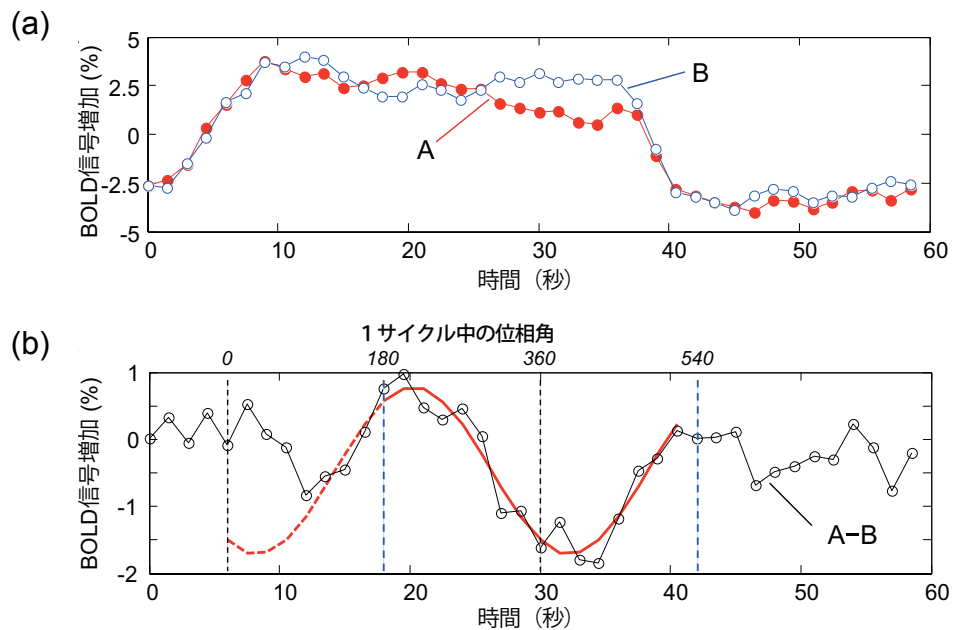
横軸の色相角は図 1 の角度 ( $\theta$ ) , 縦軸は存在比率 (%). 多様な細胞が存在する事がわかる.

図 5. ヒストグラム（極座標；全被験者平均）



赤シンボルが全被験者平均. リングの色はその方位の色を示している. 中心から伸びる 4 色の破線はユニーク色を示す. 第 1 次視覚野 (V1) では分布に偏りが大きい, 第 4 次視覚野 (V4) では偏りが減少している.

図 3. (a) BOLD 信号変化, (b) 解析方法の解説



(a) 脳活動画像の 1 画素 (ボクセル) における, 1 サイクルの視覚刺激 (色変化) 呈示に対する脳活動. 赤シンボルは図 1 の  $0^\circ$  から色変化がスタートした場合, 白シンボルは  $180^\circ$  から色変化がスタートし, 同じ速度で変化した時の脳活動を示している. (b) パネル (a) におけるカーブ A とカーブ B の差を取った信号. 正弦関数でフィッティングし (赤線)、そのピーク位置から色選択性を求める.

## 【用語解説】 (50 音順)

fMRI (エフエムアールアイ) : functional MRI (magnetic resonance imaging) の略。  
医療用の断層画像装置である MRI を利用して、神経活動に関連した信号を計測する技術。

色相 : 色の 3 属性 (色相、明度、彩度) の 1 つで、色の種類 (赤、紫、青、緑、黄、橙、など) を示すもの。図 1 は等明度の平面を示しており、この面内における中心 (灰色 / 無彩色) からの方位角を色相角と呼ぶ。中心からの距離が色の鮮やかさを意味する彩度に対応する。

視覚野 : 脳内で視覚情報処理を主に行なう領域。本研究で測定した第 1 次 (V1) から第 4 次 (V4) 視覚野にかけては、徐々に高度な情報処理を行なうレベルに移行する。V4 は特に色覚情報処理の中核と考えられており、ここを損傷すると色が見えなくなる事が知られている。

錐体 : 網膜に分布する光受容器 (光センサ)。人間では、最大感度となる波長によって 3 種類が存在し、波長の長い (赤く見える) 方から、L (long)、M (medium)、S (short) 錐体と呼ばれる。

選択性 : 神経細胞が特定の刺激に強く、他の刺激に対しては弱い反応を示す事。例えば、赤に選択的に応答する細胞は、青、緑、黄など他の色には弱く応答するか応答をほとんど示さない。

中間色 : ここでは、4 つのユニーク色 (赤 / 緑、青 / 黄) および反対色のいずれにも属さない色を呼ぶ。本研究では、図 1 に示した 2 軸の間に位置する色相を全て中間色と呼んでいる。

反対色 : 錐体の信号の差分によって決まる色のこと。図 1 の横軸は L 錐体と M 錐体の信号の差分 (L-M と略記) で、正の信号は赤みを負の信号は緑みを帯びている。縦軸は S 錐体と L および M 錐体の和の信号との差分 (S-(L+M) と略記) で、正の方向は青み、負の方向は黄色みを帯びている。この 2 軸を「反対色軸」とも言う。脳以前の網膜などでは、反対色の組み合わせで色情報が構成されている。

BOLD (ボールド) 信号 : Blood Oxygenation Level Dependent 信号の略で、fMRI によって脳活動を測定する際の信号の種類を表す。血液中のヘモグロビンが酸素と結びついているか否かによって電磁気的な特性が変化する原理に基づき、神経活動による酸素消費を反映した信号。

ボクセル (voxel) : fMRI により取得される画像の画素 (ピクセル) のこと。

ユニーク色 : 色の見え方を表現する組み合わせにおいて、基準と考えられている色 (赤 / 緑、青 / 黄) を指す。例えば、紫は青と赤、橙は黄と赤の組み合わせで表現できる。図 5 の原点から放射状に伸びる点線は各被験者について測定したユニーク色の平均を示しているが、反対色 (縦軸 / 横軸方向) とは一致しない。