

令和元年6月18日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K21148

研究課題名(和文)脳磁図を用いた色彩調和判断における時間的機序の解明

研究課題名(英文)Temporal mechanisms in color harmony judgment using magnetoencephalography

研究代表者

池田 尊司 (Ikeda, Takashi)

金沢大学・子どものこころの発達研究センター・助教

研究者番号：80552687

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、研究課題(1)として、機能的磁気共鳴画像法によって色彩調和判断に関わる脳領域を抽出し、次に研究課題(2)として記憶に関わる脳活動の変化を、脳磁図(MEG)を用いて計測する。研究期間中に得られた結果より、色彩刺激の記憶にも深く関わる前頭前野は、色彩調和判断に欠くことのできない脳領域であることがわかった。また、不調和配色に反応する扁桃体は、MEGによる信号源推定の信頼性が低く、前頭前野と同時に評価するためには技術的な進展が必須であり、さらなる研究が必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、ヒトが物の価値をどのように決めているのかという価値判断に対して示唆を与えるものである。また、MEGを用いた脳機能研究を進める中で共同研究が立ち上がった。MEG計測においては、頭の動きがあるとデータの信頼性を損なうため、頭部運動を極力抑えることが求められる。計測中に頻発するこの問題を解決に導く技術を開発し、共同で特許申請を行うことができた。

研究成果の概要(英文)：First, brain regions involved in color harmony judgment were identified using functional magnetic resonance imaging. Second, changes in brain activity related to memory process were measured using magnetoencephalography (MEG). From these results, we found that the prefrontal cortex, which is deeply involved in the memory of color stimuli, is an essential brain area for color harmony judgment. The amygdala responding to disharmonious color combinations had low reliability of signal source estimation using MEG. Further studies are needed to assess the activity of the amygdala simultaneously with the prefrontal cortex.

研究分野：認知神経科学

キーワード：MEG 色彩調和 ワーキングメモリ

1. 研究開始当初の背景

色の用いられ方、色の組み合わせに関しては、芸術作品は言うまでもなく私たちの日常生活においても大きな関心が寄せられている。服の色遣いや、インテリアと日用品など、その応用範囲は広大である。色の美しさを規定しようとする試みは幾度となく行われてきたが、これらは単色刺激の印象について評定させる課題が大半であった。これらの研究から導き出される一般的な傾向は、年代による分析などの縦断的研究や、文化の異なる国どうしの比較を行った横断的研究として結実している。しかし、一般的に評価の高い色である鮮やかな青も、隣接する領域の色によって印象は劇的に変化し、隣接する領域が白であれば評定値は高くなるが、暗い赤では低くなる。そして、自然環境においては視野内にただ1つの色のみが存在するという状況はなく、周囲には何らかの色が付随している。すなわち、色の美的評価は、周囲に配置された色に大きく依存するため、単色よりも、複数の色の組み合わせである配色刺激を用いて検討されることが望ましい。

このような配色刺激を用いて、視覚的な美しさである色彩調和の神経基盤を調べる研究を進めている。過去には、観察者が調和していると思う配色を観察しているときと、不調和であると思う配色を観察しているときの脳活動の違いを機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) によって検証した (Ikeda et al., 2015)。ここでは、2×2のチェッカーボードパターンを構成する2色配色を観察刺激とした。このパターンに対し、27色のカラーパレットから2色ずつ選び出し、351種類の配色刺激を作成した。また、「調和している」という主観的な感覚と脳活動の対応をみるため、実験参加者に対しては事前に調和・ニュートラル・不調和と判断される組み合わせを351種類のパターンの中から30個ずつ選んでもらい、これらをMRIスキャナの中で観察してもらった。さらに、スキャナの中でも評定課題を行い、調和していると感じたときの脳活動を確実に拾い出す実験デザインを組んだ。その結果、調和する組み合わせを見ているときには大脳の最も前方かつ底面に近い眼窩前頭皮質の内側部が活動し、不調和な組み合わせを見ているときには扁桃体が活動することがわかった。

これらの領域は色の調和・不調和という主観的な美しさおよび醜さを得るための判断の結果を示すものであるが、視覚入力からこの結果を得るまでには、共通の調和判断プロセスが働いているはずである。そして、この判断には過去の経験および直前に得た文脈が関係していると考えられる。まずは研究課題(1)として、判断に関わる脳領域を抽出し、次に研究課題(2)として記憶を含めた脳活動の変化を、脳磁図 (MEG) を用いて計測する。

2. 研究の目的

(1) まずは、色彩調和判断に関わる脳領域の抽出を行う。本研究では先行研究 (Ikeda et al., 2015) で用意した心理物理的特性を統制した配色刺激セットを用意し、空間解像度に優れるfMRIによって検証した。主観的な調和・不調和の判断を行わせる課題 (Harmony 条件) を遂行しているときの脳活動を計測し、この判断に特有の脳領域の抽出を行う。そして同様の配色刺激に対して異なる判断を行わせるために色差の大小を答えさせる課題 (Difference 条件) を導入し、この課題を統制条件とすることで、美しさの判定に関わる領域のみを抽出するのが目的である。

(2) MEGを用いて、色彩刺激を記憶しているときの脳活動を計測する。本研究では、先行研究 (Ikeda & Osaka, 2007) に従い、色のカテゴリ内比較となる Within 条件・カテゴリ間比較となる Cross 条件・色名単語による言語性課題となる Word 条件を比較した。また、近年広く用いられるようになった非侵襲的刺激法である経頭蓋直流刺激 (tDCS) を併用し、前頭前野の働きにバイアスをかけて、言語と視覚の記憶に交互作用をもたらすかどうかとも検討した。国際10-20法で左前頭部を示すF3を陽極とした刺激を用いると健常成人のワーキングメモリ (WM) 容量を向上させる効果があることが報告されており、視覚刺激の種類に依存せず容量の向上が見られるのであれば、モダリティを問わない実行系機能の亢進を表す。また、Word条件のみ容量の向上がみられる場合は、左前頭前野に局在する言語性ワーキングメモリの機能向上と関連するであろう。tDCSによる刺激は脳にどのような影響を及ぼし、それが行動の変容につながるのかどうかを調べることで、この問題を明らかにできる。本研究では、左前頭部のF3を陽極、その右側に相当するF4を陰極に設定し、tDCSがWM容量を向上させるのか、またMEGを用いることで刺激部位付近の脳活動がどのように変容したのかを検証した。

3. 研究の方法

(1) 実験参加者は19歳~30歳の20名 (男性12名・女性8名) の右利き健常成人であった。色覚検査には石原式学校用色覚異常検査表を用い、全員が3色覚であると判定された。視覚刺激は視角8°の正方形の中に4つの正方形 (各辺4°) が含まれ対角線上に同じ色を配置した2色配色パターンであった。用いた色は、PCCSの6色相 (赤・オレンジ・黄・緑・青・紫) 4トーン (vivid・pale・light grayish・dark) に3つの無彩色 (白・灰・黒) を加えた全27色で、予備調査ではこれらを全て組み合わせた351通りの2色配色を採用した。刺激の色度は

PCCSに基づいているが、fMRI 実験に用いたプロジェクタの色域を考慮し CIELAB 色空間内での色度が等しくなるように色彩輝度計 (CS-100A, コニカミノルタ製) による計測と調整を行い、液晶ディスプレイ (LCD2690WUXi, NEC 製) 上に作成した。背景は刺激に用いた灰色より暗いニュートラルな灰色であった。実験参加者は、351 通りの刺激に対して 9 件法による評定を 2 回ずつ行った。評定実験と後述する fMRI 実験の刺激操作と行動データの取得には Presentation® (Neurobehavioral Systems, Inc., Berkeley, CA) を用いた。参加者全員の平均値をとり、各刺激の調和スコアを算出した。

fMRI 実験の参加者は 20 歳～33 歳の健常成人 14 名 (男性 8 名・女性 6 名) であった。色覚は The Farnsworth-Munsell D-15 Test を用いて検査し、全員が 3 色覚であることを確認した。fMRI 装置に設置されているプロジェクタ (DLA-G150CL, Victor 製) を使用するにあたり、予備調査で用いた色と同等の見えを実現するために、色彩輝度計 (CS-200, コニカミノルタ製) による計測と調整を行った。配色刺激に用いた 2 色の色差は、CIELAB 色空間における色差 (ΔE_{ab}^*) として算出した。

実験参加者は、fMRI スキャナ中で調和・不調和を判定する Harmony 条件と、色差の大小を判定する Difference 条件およびボタン押しのみ Button 条件を行った。1 試行は 30 秒で構成され、その間に 10 回の刺激呈示とそれに対する判断がなされた。各条件とも 10 試行ずつ行われた。Harmony 条件で用いられた 100 種類の調和・不調和配色刺激は、両群で色差がほぼ等しくなるように抽出し、Difference 条件で用いられた色差が大・小となる 50 種類の配色刺激は、予備調査での調和スコアが両群でほぼ等しくなるように抽出した。Difference 条件では、1 回の実験中に同じ配色刺激が 2 回呈示された。

脳機能画像の取得は 3 テスラの MRI スキャナ (Verio, Siemens 製) で行われた。機能画像は 2 秒ごとに 577 回撮像され、1 つの機能画像は 30 枚の 2D 画像で構成されていた。また、昨日画像の取得後に詳細な脳の構造画像 (T1 強調画像) を取得した。脳機能画像解析には SPM12 (Wellcome Trust Centre for Neuroimaging, London, UK) を用い、Harmony 条件と Difference 条件における脳活動を算出した。

(2) 実験参加者は 20 歳～23 歳の健常成人 24 名 (全て男性) の右利き健常成人であり、ランダム化二重盲検プラセボ対照クロスオーバー比較試験によって tDCS の効果を検証した。本試験は金沢大学倫理審査委員会の承認を受け、臨床試験登録を済ませている (UMIN000021058)。実刺激 (tDCS) 先行群と偽刺激 (Sham) 先行群は第三者によって振り分けられ、1 回目と 2 回目の実験は少なくとも 30 日以上ウォッシュアウト期間を設けた。

実験参加者は、両日ともに 5×7cm のスポンジで覆われたゴム電極を備えた刺激装置 (DC-STIMULATOR Plus, neuroConn GmbH 製) による 2mA の tDCS または開始直後に電流を遮断する Sham 刺激を計 40 分受けた後、MEG (MEGvision PQA160C, Ricoh Company, Ltd. 製) 内で WM 容量を計測する 3-back 課題を行った。3-back 課題の刺激操作と行動データの取得には Presentation® (Neurobehavioral Systems, Inc., Berkeley, CA) を用い記憶刺激は視覚的に呈示した。Word・Cross・Within 条件を設け、それぞれ色名単語・カテゴリ間色票・カテゴリ内色票を記憶刺激とした。

MEG データの解析には Brainstorm (Tadel et al., 2011) を使用し、Signal Space Projection によって心拍と瞬目による影響を除去した。実験終了後に取得した各参加者の MRI 構造画像より灰白質を描出し、LCMV Beamformer による信号源推定を行った。本研究の関心領域である左前頭前野は、Desikan-Killiany アトラスの Left Rostral Middle Frontal を基準に信号を抽出した。この信号に対して時間周波数解析を行った。視覚刺激呈示の 400ms 前から 100ms 前までを基線区間とし、事象関連同期を計算した。

4. 研究成果

(1) 両条件に共通する領域を抽出したところ、第二次視覚野 (V2) が得られた。個人解析の結果のうち、Harmony 条件から Difference 条件、および Difference 条件から Harmony 条件を差分したそれぞれ 14 名分の画像を取得し、次に両条件に対して 1 サンプルの *t* 検定を行った。その際の有意水準は 5% とし、クラスターレベルで多重比較補正を行った。Difference 条件と比べて Harmony 条件で有意な賦活が見られた領域は、第四次視覚野 (V4) を含む両側の紡錘状回 (FG, BA37)・後頭葉 (BA18/19)・左頭頂間溝 (IPS, BA7)・下前頭回 (IFG, BA47)・左上前頭回 (SFG, BA6/8) 前部帯状回 (ACC, BA32) であった。対して Difference 条件で有意な賦活が見られた領域は縁上回 (SMG, BA40) であった。

実験の結果、色彩調和判断課題は後頭葉から側頭葉にかけての視覚野を強く活動させた。特に、紡錘状回における賦活部位は、色知覚の成立に重要な役割を果たす V4 を含んでいる。また、Jacobsen ら (2006) は幾何学図形の美しさを評定させる実験において IFG の積極的な関与を示している。IFG の中でも前部に位置する BA47 は、モラル判断でも美的判断同様に活動が報告されている領域である (Avram et al., 2013)。色差を判断するとき比べ、色彩調和の判断には高次視覚野および社会脳を構成する領域の関与があることが示唆された。これらを総合すると色彩調和判断は色の知覚と評定者にとっての社会的価値に関わる判断が共起することでなされていると考えられる。

(2) 3-back 課題における WM 容量の指標である d' と、処理速度を示す反応時間について 2 要因の分散分析を行ったところ、いずれも tDCS の主効果および交互作用は有意ではなかったが、記憶刺激条件の差は有意であった。MEG データの時間周波数解析の結果、FDR 補正を併用した t 検定によって Sham 刺激と比較したとき tDCS 施行後には 82-84Hz の High-gamma 帯域で有意な信号変化率の上昇がみられた。この帯域における信号変化率を抽出し、2 要因の分散分析を行うと、tDCS の主効果および条件の主効果が有意であった(図 1)。事象関連同期の強さと d' の相関をとると、Sham 条件では有意な正の相関がみられたが tDCS 条件では有意ではなかった。

実験の結果、健常成人に対する tDCS の影響は WM 容量および処理速度に有意な影響を持たなかったことがわかった。しかし左前頭前野においては有意な High-gamma 帯域の同期が増強されていたことが確認された。この脳活動の変化は 3-back 課題の成績と相関を持たなかったこと、そして記憶刺激の種類にのみ影響されていることから、tDCS が惹起した大脳皮質の興奮状態の変化は WM 容量と直接関係を持たないものであったといえる。

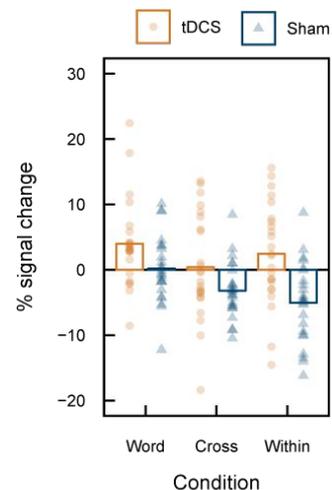


図1 左前頭前野における High-gamma帯域の活動

研究期間中に得られた以上の結果より、前頭前野は色彩調和判断に欠くことのできない脳領域であることがわかった。また、MEG による信号源推定の信頼性が高い領域は、センサーからの距離が近い大脳皮質の表面であることがわかった。このため、扁桃体の活動を直接推定することが難しく、時間的な活動パターンを前頭前野と同時に評価するためには技術的な進展が必須であり、さらなる研究が必要である。

Ikeda, T., Matsuyoshi, D., Sawamoto, N., Fukuyama, H., & Osaka, N. (2015). Color harmony represented by activity in the medial orbitofrontal cortex and amygdala. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 382. doi:10.3389/fnhum.2015.00382

Ikeda, T., & Osaka, N. (2007). How are colors memorized in working memory? A functional magnetic resonance imaging study. *Neuroreport*, 18(2), 111-114. doi:10.1097/WNR.0b013e328010ff3f

Tadel, F., Baillet, S., Mosher, J. C., Pantazis, D., & Leahy, R. M. (2011). Brainstorm: a user-friendly application for MEG/EEG analysis. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2011, 879716. doi:10.1155/2011/879716

Jacobsen, T., Schubotz, R. I., Höfel, L., & Cramon, D. Y. (2006). Brain correlates of aesthetic judgment of beauty. *Neuroimage*, 29(1), 276-285. doi:10.1016/j.neuroimage.2005.07.010

Avram, M., Gutyrchik, E., Bao, Y., Pöppel, E., Reiser, M., & Blautzik, J. (2013). Neurofunctional correlates of esthetic and moral judgments. *Neuroscience Letters*, 534, 128-132. doi:10.1016/j.neulet.2012.11.053

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Ikeda, T., Takahashi, T., Hiraishi, H., Saito, D. N., & Kikuchi, M. (2019). Anodal transcranial direct current stimulation induces high gamma-band activity in the left dorsolateral prefrontal cortex during a working memory task: A double-blind, randomized, crossover study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 査読有, 13, 136. doi:10.3389/fnhum.2019.00136

Miyagishi, Y., Ikeda, T., Takahashi, T., Kudo, K., Morise, H., Minabe, Y., & Kikuchi, M. (2018). Gamma-band auditory steady-state response after frontal tDCS: A double-blind, randomized, crossover study. *PLoS One*, 査読有, 13(2), e0193422. doi:10.1371/journal.pone.0193422

〔学会発表〕(計 2 件)

池田尊司・苧阪直行・苧阪満里子 (2019) 色彩調和判断に関わる脳機能解析 平成 30 年度日本色彩学会関西支部大会

Osaka, N., Ikeda, T., Osaka, M. (2018). Neural Correlates of Color Harmony. ACA2018.

〔図書〕(計 2 件)

池田尊司 芸術における色彩と脳の働き 朝倉書店 「情動と言語・芸術」(川畑秀明・森悦朗編) 31-55

池田尊司 色の認知・記憶と脳 北大路書房 「生理心理学と精神生理学 第 巻 展開」(堀

〔産業財産権〕

出願状況（計 1 件）

名称：計測装置およびシステム

発明者：池田尊司・菊知充・吉村優子・森瀬博史・工藤究・三坂好央・奥村栄一

権利者：株式会社リコー・国立大学法人金沢大学

種類：特許

番号：2018-051791

出願年：2018

国内外の別：国内

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。