

fMRI による共感覚の計測 色聴者の音楽聴取時の脳活動

高橋 理宇真¹, 藤澤 隆史¹, 長田 典子¹, 杉尾 武志², 井口 征士³
関西学院大学理工学部¹, 同志社大学文化情報学部², 宝塚造形芸術大学メディアコンテンツ学部³

概要

「音を聴くと、色が見える」という現象は、色聴と呼ばれており、共感覚の1つである。こうした現象は、感覚モダリティ間の関係を明らかにする上で重要な手がかりとなることが期待される。本研究は、色聴保持者において音楽聴取時に実際に色知覚に参与している脳内領域で活動が生じているかをfMRIを用いて計測した。実験はブロックデザインで行われ、課題刺激は音楽、レストはbeep音の呈示が行われた。分析はSPM99を用いて行われた。色聴保持者固有の賦活領域として紡錘状回および上前頭回が抽出され、紡錘状回において色知覚に関わるV4/V8付近で有意な活動がみられた。このことは、色聴が聴覚系と視覚系の直接的な相互作用により生じていることを示唆している。また左紡錘状回が右に比べて広く賦活していることより、色聴は左紡錘状回が相対的に重要な役割を担っていると考えられる。

fMRI Study of Synesthesia

Brain activation in colored-hearing by listening to music

Riuma Takahashi¹ Takashi X. Fujisawa¹ Noriko Nagata¹ Takeshi Sugio² Seiji Inokuchi³
School of Science and Technology, Kwansei Gakuin University¹
Faculty and Culture and Information Science, Doshisha University²
Faculty of Media Contents, Takarazuka University of Art and Design³

Abstract

A phenomenon which the person can see color when hearing sound is called colored-hearing. It is one type of synesthesia. In this study, we observed brain activity in colored-hearing synesthete by using fMRI when they listened to music. We compared activations between colored-hearing and non-colored-hearing subjects. Additionally, we analyzed the relationship between the common area of only colored-hearing synesthetes and the regions of color perception. We found that only colored-hearing synesthetes activate fusiform gyrus and superior frontal gyrus, and their activations in fusiform gyrus are located near the regions of color perception.

1. はじめに

心理学の分野で「共感覚」知覚と呼ばれる現象がある。これは「音に色を感じる」、「数字に色を感じる」、または「味に形を感じる」など、1つの物理的的刺激が本来独立な異なる感覚を誘発することをいう。共感覚保持者は2,000人に1人の割合と推定されていて、女性に多いとも言われている[1]。

共感覚の中で「音を聴くと、色が見える」という現象は、色聴と呼ばれている。色聴は共感覚の中でも比較的が多い現象で、ある楽器の音色を聴くと特定の色彩が喚起される、音の高さに色の明度が対応づけられる、あるいは母音と音色が関連しているなど多くの報告がある。特に調性と色の対応は、色聴の典型的事例としてよく取り上げられる[2]。

共感覚保持者に着目した研究は古くから音楽心理学の分野で行われてきたが、19世紀ごろから科学的な視点での

アプローチがされるようになった[3]。その1つとして神経科学の分野がある。

神経科学では脳の構造、仕組み、働きを理解するための試みとして、失語症や色盲などの特殊な臨床例に着目し観察することにより脳機能の解明を行う研究が行われてきた。近年、fMRIやPETといった脳の活動を非侵襲的に計測する方法が発達したため、活動中の脳機能を計測する研究が急速に進展している。脳の機能については未解明である部分が多い。脳の構造や機能、あるいは脳の可塑性を示す手がかりの1つとして共感覚が注目されてきている。

共感覚の脳機能計測も最近盛んに行われている。色聴に関する先行研究として、J.A.Nunnらが'spoken word'に対する色聴現象をfMRIを使った計測を行っている[4]。しかし、音楽聴取による色聴現象を計測した例は無い。

我々は、色聴保持者に対してfMRIを使い、音楽聴取時

の計測を行っている[5]。今回は、(1)計測結果における色聴保持者と非色聴保持者との比較、(2)色聴保持者同士の比較、(3)色聴保持者と色覚に関わる領域における活動とその部位についての3つの考察を行った。

2. 方法

2.1 被験者

被験者は色聴能力を持つ女性2名と色聴能力を持たない女性1名であり、年齢は25~36歳である。また色聴保持者1名と非色聴保持者1名は刺激呈示時に閉眼で、色聴保持者1名は開眼である。

2.2 撮像条件

fMRI装置は島津 Marconi 社製の MAGNEX ECLIPSE 1.5T Power Drive 250 を用い、グラディエントエコープランナー法 (TR/TE = 4000ms/55ms, スライス厚/スライスギャップ = 4mm/0mm, FOV=256mm, スライス枚数=38) によって全脳を撮像した。

2.3 実験方法

ブロックデザインに基づき刺激呈示を行った。被験者には課題刺激として音楽、レストとして beep 音を用いた。各ブロックはレスト 16sec に続いて課題 24sec が呈示され、合計4ブロックで構成された。課題中の音楽は、調性の異なる Jazz, Classic, Pops などの曲からランダムに2曲を12sec ずつ続けて呈示した。

2.4 fMRI 撮像と解析

解析は SPM99[6]を用いて行った。各被験者の fMRI データに対し、動きの補正 (realignment)、標準脳への変換 (normalization)、平滑化 (smoothing) の順で処理を行

い、音楽聴取時の賦活座標を求めた。表1および図1にこの時の賦活部位を示す。

表1：各被験者の賦活座標

| 色聴者 A : (閉眼) 音楽聴取時の脳の賦活座標 | | | | | | | |
|---------------------------|-----------------------|---------------------------|-----|------|----------------|-------------------------|----|
| Hemisphere (LH/RH) | Cluster size (voxels) | Talairach coordinate (mm) | | | T-value | Activate area | BA |
| | | x | y | z | | | |
| LH | 1718 | 0 | 26 | 48 | 11.52 | Medial Frontal Gyrus | 8 |
| | 1389 | -32 | -2 | 44 | 7.49 | Middle Frontal Gyrus | 6 |
| | 1389 | -46 | -3 | 52 | 7.07 | Precentral Gyrus | 6 |
| | 1389 | -53 | 11 | 31 | 6.05 | Inferior Frontal Gyrus | 9 |
| | 527 | -10 | -83 | 1 | 3.62 | Lingual Gyrus | 17 |
| | 442 | -36 | -1 | -10 | 4.62 | Extra-Nuclear | 13 |
| | 442 | -53 | 4 | -5 | 6.57 | Superior Temporal Gyrus | 38 |
| | 442 | -38 | 7 | -19 | 5.08 | Superior Temporal Gyrus | 38 |
| | 259 | -46 | -69 | -20 | 4.92 | Declive | |
| | 259 | -30 | -59 | -21 | 4.31 | Declive | |
| RH | 259 | -24 | -75 | -16 | 4.36 | Fusiform Gyrus | 19 |
| | 1718 | 2 | 18 | 58 | 7.97 | Superior Frontal Gyrus | 6 |
| | 1718 | 2 | 11 | 66 | 7.75 | Superior Frontal Gyrus | 6 |
| | 1292 | 34 | 4 | 48 | 6.61 | Middle Frontal Gyrus | 6 |
| | 1292 | 53 | 2 | 35 | 5.56 | Precentral Gyrus | 6 |
| | 1292 | 57 | 7 | 25 | 8.72 | Inferior Frontal Gyrus | 9 |
| | 548 | 50 | -2 | -3 | 5.87 | Superior Temporal Gyrus | 22 |
| | 548 | 50 | 7 | -5 | 5.06 | Superior Temporal Gyrus | 22 |
| | 548 | 38 | 29 | -3 | 5.11 | Inferior Frontal Gyrus | 47 |
| | 527 | 2 | -84 | -14 | 9.39 | Lingual Gyrus | 17 |
| 527 | 2 | -78 | 2 | 6.08 | Lingual Gyrus | 18 | |
| 376 | 32 | -59 | -21 | 5.85 | Declive | | |
| 376 | 18 | -71 | -13 | 7.08 | Lingual Gyrus | 18 | |
| 376 | 24 | -80 | -16 | 3.83 | Fusiform Gyrus | 19 | |

| 色聴者 B : (閉眼) 音楽聴取時の脳の賦活座標 | | | | | | | |
|---------------------------|-----------------------|---------------------------|-----|-----|---------|------------------------|----|
| Hemisphere (LH/RH) | Cluster size (voxels) | Talairach coordinate (mm) | | | T-value | Activate area | BA |
| | | x | y | z | | | |
| LH | 282 | -12 | -76 | -13 | 5.62 | Lingual Gyrus | 18 |
| | 282 | -38 | -67 | -12 | 6.82 | Fusiform Gyrus | 19 |
| | 282 | -26 | -73 | -15 | 5.45 | Fusiform Gyrus | 19 |
| | 142 | -4 | -19 | 65 | 5.01 | Superior Frontal Gyrus | 6 |
| | 142 | -2 | 11 | 66 | 4.72 | Superior Frontal Gyrus | 6 |
| | 47 | -38 | -44 | -26 | 4.88 | Culmen | |
| | 47 | -34 | -54 | -31 | 4.84 | Cerebellar Tonsil | |
| RH | 47 | -46 | -56 | -24 | 4.67 | Tuber | |
| | 142 | 8 | 19 | 64 | 6.54 | Superior Frontal Gyrus | 6 |
| | 48 | 32 | -75 | -18 | 4.98 | Fusiform Gyrus | 19 |

| 非色聴者 : (閉眼) 音楽聴取時の脳の賦活座標 | | | | | | | |
|--------------------------|-----------------------|---------------------------|-----|----|---------|---------------------------|----|
| Hemisphere (LH/RH) | Cluster size (voxels) | Coordinate Talairach (mm) | | | T-value | Activate area | BA |
| | | x | y | z | | | |
| LH | 612 | 61 | -17 | 14 | 8.34 | Transverse Temporal Gyrus | 42 |
| | 612 | 61 | -38 | 15 | 6.41 | Superior Temporal Gyrus | 22 |
| | 612 | 55 | -13 | 6 | 5.85 | Superior Temporal Gyrus | 22 |
| | 610 | 44 | 5 | 55 | 6.46 | Middle Frontal Gyrus | 6 |
| | 610 | 53 | 18 | 40 | 6.25 | Middle Frontal Gyrus | 8 |
| | 610 | 53 | 3 | 51 | 5.41 | Precentral Gyrus | 6 |
| | 462 | 51 | 13 | -2 | 5.68 | Superior Temporal Gyrus | 22 |
| | 462 | 50 | 23 | -8 | 5.62 | Inferior Frontal Gyrus | 47 |
| | 462 | 10 | 1 | 15 | 4.91 | Subcallosal Gyrus | 34 |
| | 412 | -50 | -4 | -5 | 6.22 | Superior Temporal Gyrus | 38 |
| RH | 412 | -42 | 9 | -9 | 5.91 | Extra-Nuclear | 13 |
| | 412 | -51 | -17 | 5 | 4.97 | Superior Temporal Gyrus | 22 |
| | 266 | -53 | 8 | 44 | 5.61 | Middle Frontal Gyrus | 6 |
| | 266 | -53 | 14 | 38 | 5.46 | Middle Frontal Gyrus | 8 |
| | 266 | -50 | -3 | 54 | 5.14 | Precentral Gyrus | 6 |
| | 204 | -42 | -41 | 41 | 6.55 | Inferior Parietal Lobule | 40 |

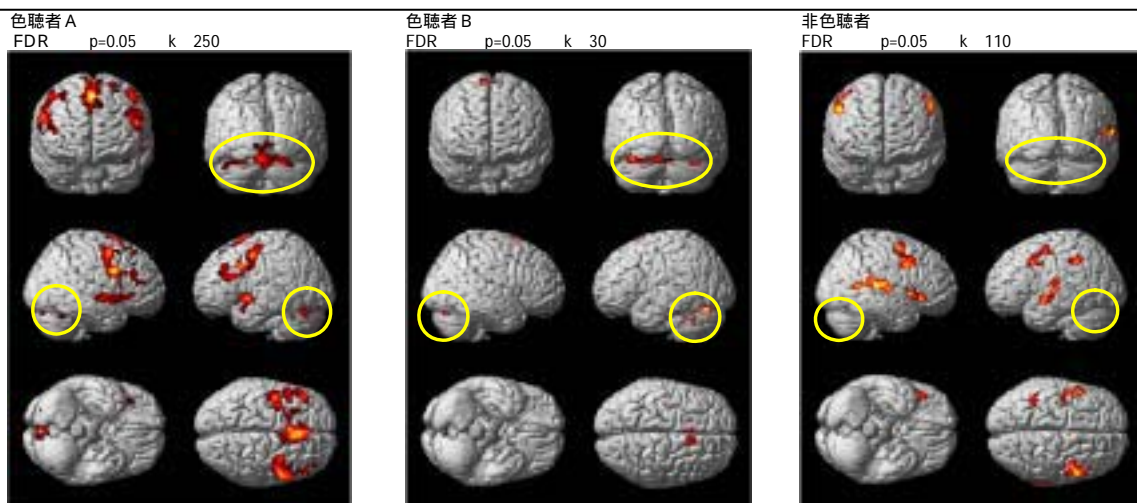


図1：各被験者の賦活部位

結果に対して以下の3つの解析を行う。(1)音楽聴取時の色聴保持者特有の脳活動部位を抽出するために、非色聴保持者の脳活動との非共通性、および色聴保持者同士の脳活動の共通性を求める。具体的には賦活部位同士の距離が近いものを共通賦活部位として抽出する。(2)色聴保持者の紡錘状回における賦活部位と、色知覚関連領域との関係性を明らかにするために、先行研究において色知覚に関わる部位であるとされているV4, V4, V4v, V8野の座標[7][8]と賦活部位との距離を(1)と同様に算出する。(3)色聴保持者の色知覚関連部位での詳細な活動を確認するため、スライス画像の重ね合わせを求める。

以上3つの解析により色聴現象の詳細な検討を行った。

3. 結果

3.1 色聴保持者に共通する賦活領域の抽出

表1および図1より、色聴保持者Aからは上前頭回(superior frontal gyrus)、紡錘状回(fusiform gyrus)、上側頭回(superior temporal gyrus)の3領域で活動が見られ、色聴保持者Bからは上前頭回と紡錘状回の2領域で活動が見られた。ただし上側頭回については、非色聴保持者にも賦活が認められた。

賦活部位の共通性を調べるため、すべての賦活部位間の距離を算出し、被験者間で10mm以下に位置する部位のペアを求めた。結果は表2に挙げた左右上前頭回および左右紡錘状回内の6部位(色聴保持者Bでは7部位)であった。これらは、色聴保持者間だけに共通する部位が抽出され、非色聴保持者との間には共通部位が認められなかったことを示している。

3.2 色知覚関連部位との関係

次に、抽出された色聴保持者の賦活部位が、先行研究で

色知覚に関連するとされた部位とどのような位置関係にあるかを調べるために、部位間の距離を求めたものを表2に示す。表から、色聴保持者2名に共通する賦活パターンが2カ所見られることがわかる。1つは左右両半球のV4, V4v, V8に囲まれた部位(表中a-1とb-1およびa-2とb-2)であり、他の1つは左半球のV4, V4, V8に囲まれた部位(表中a-3とb-3)である。この結果から、色聴保持者では

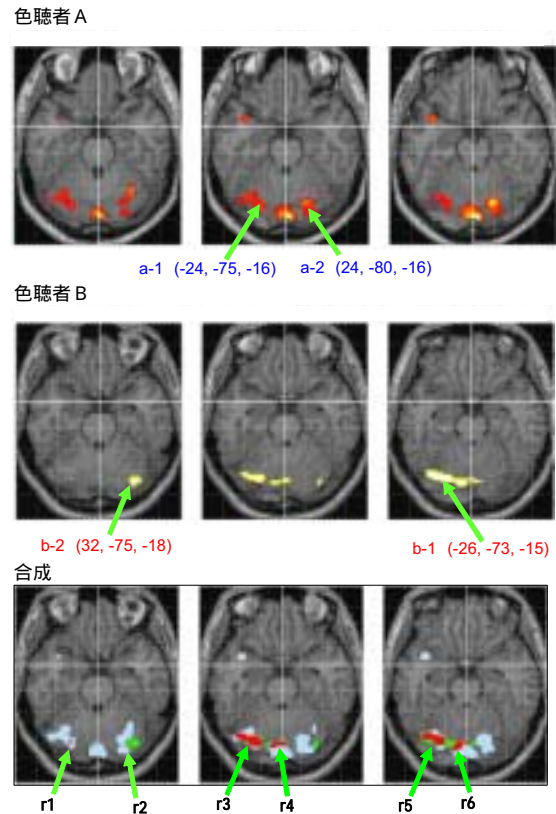


図2：各色聴保持者のスライス画像と色聴保持者の合成

表2：色聴保持者の賦活座標と各色知覚関連部位との関係

| 被験者 | 番号 | 脳部位名 | 座標 | S. Zeki (1999) | | | | N. Hadjikhani (1998) | | | |
|------|-----|-------------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------------|----------------|-----------------|----------------|
| | | | | V4 | | V4 | | V4v | | V8 | |
| | | | | left | right | left | right | left | right | left | right |
| | | | | (-22, -72, -12) | (20, -72, -10) | (-34, -54, -14) | (30, -50, -20) | (-32, -87, -16) | (32, -87, -16) | (-33, -65, -14) | (33, -65, -14) |
| 色聴者A | a-1 | Fusiform Gyrus | (-24, -75, -16) | 5 | | 23 | | 14 | | 13 | |
| | a-2 | Fusiform Gyrus | (24, -80, -16) | | 10 | | 30 | | 10 | | 17 |
| | a-3 | Declive | (-30, -59, -21) | 17 | | 9 | | 28 | | 9 | |
| | a-4 | Precentral Gyrus | (-46, -69, -20) | 25 | | 20 | | 23 | | 14 | |
| | a-5 | Occipital Lobe | (18, -71, -13) | | 3 | | 25 | | 21 | | 16 |
| | a-6 | Declive | (32, -59, -21) | | 20 | | 9 | | 28 | | 9 |
| 色聴者B | b-1 | Fusiform Gyrus | (-26, -73, -15) | 5 | | 20 | | 15 | | 10 | |
| | b-2 | Fusiform Gyrus | (32, -75, -18) | | 14 | | 25 | | 12 | | 10 |
| | b-3 | Fusiform Gyrus | (-38, -67, -12) | 16 | | 13 | | 21 | | 5 | |
| | b-4 | Lingual Gyrus | (-12, -76, -13) | 10 | | 31 | | 23 | | 23 | |
| | b-5 | Culmen | (-38, -44, -26) | 35 | | 16 | | 44 | | 24 | |
| | b-6 | Cerebellar Tonsil | (-34, -54, -31) | 28 | | 17 | | 36 | | 20 | |
| | b-7 | Tuber | (-46, -56, -24) | 31 | | 15 | | 34 | | 18 | |

- ..18mm以下の部分
- ..V4,V4v,V8の間に位置する賦活座標
- ..V4,V4, V8の間に位置する賦活座標

色知覚に関連する部位が共通して賦活していること、V4, V4v, V8 間において左右同側部位において賦活が見られること、V4, V4, V8 間において左半球にのみ賦活が見られることが確認された。

3.3 スライス画像による色知覚部位での賦活領域の特定

さらに色聴保持者 2 名のスライス画像から、賦活領域を詳細に特定する。図 2 において、上から順番に色聴保持者 A, B のスライス画像 (MNI 座標, Z=-26, -24, -22mm) である。最下段は色聴保持者 2 名の賦活領域を重ね合わせたもので、2 名に共通して賦活したボクセルを濃い色で表し矢印で示している。図において、共通して賦活した領域は、右半球ではかなり限定されているのに対し (r2), 左半球では広範囲にわたっている (r1, r3, r5) ことから、色聴は、左紡錘状回が相対的に重要な役割を担っていることが示唆される。

4. 考察

音楽呈示を行ったときに、色聴保持者には共通し、非色聴保持者には認められない色聴固有の賦活領域として紡錘状回および上前頭回が抽出された。

上前頭回は、音に対する高次の処理を行う部分といわれており、特に上前頭回の利き手と反対側の非優位半球で、音楽の旋律や認識が行われていることが知られている[7]。今回観測された上前頭回の活動も、被験者の音楽の聴取によるものだと推測される。今後、詳細な解析を行う予定である。

一方、紡錘状回は色、文字や顔などの認識に対し反応することが知られており、視覚野の処理において高次の特徴に特化した処理をおこなう領域とされている[8][9][10]。視覚野は V1, V2, V4, V8 など幾つかの部分から構成され、それぞれが機能局在していることが知られている[11]。今回の色聴保持者に見られた紡錘状回の賦活部位は、色の知覚や処理に関係する V4, V8 の近傍に相当し、ここが音楽聴取によって賦活されたということは、色聴が聴覚系と視覚系の直接的な相互作用により生じていることを示唆している。

さらに、左紡錘状回が右に比べて広く賦活していることから、色聴は左半球が相対的に重要な役割を担った活動であることが示唆された。Nunn らの先行研究[4]では、spoken words に対する色聴が右半球の V4 連合領域 (V4/V8/V4) に優位な賦活を示したことが報告されている。翻って考えると、今回の実験における色聴は左半球の V4 連合領域 (V4/V8/V4) で優位な活動が認められたとともに、左右半球に新たに別の V4 連合領域 (V4/V8/V4v) の存在を示唆したものと言える。

加えて別の先行研究[11]では、左 V4 が実際の色の知覚に関与し、右 V4 が色の想起に関与するという知見が述べられている。今回、2 人の色聴保持者は開眼と閉眼の異なる条件で実験を行ったが、いずれの場合においても色知覚領域の賦活が確認されている。このことを考え合わせると、色聴の色は real な色と競合するものではなく、いわば dual representation のような現象であるとの仮説が考えられる。

5. おわりに

本研究では、色聴保持者の音楽聴取時における脳内活動を fMRI を用いて計測し、実際に色知覚領域である V4/V8 の近傍で活動が生じていることを示した。これは色聴保持者が持つ特有の能力を神経科学的に示す証拠になる。また、音楽と色のモダリティにおける相互作用を考える 1 つの知見となる。さらには、コンテンツ制作や音楽教育といった応用における知見にもなると思われる。

今後は、さらなる被験者の協力を得て詳細な計測を進めていくとともに、こうした現象が起きるメカニズムを脳のレベルから考えて行きたい。最近の共感覚研究ではメカニズムの仮説として主に、cross-wiring 仮説 (部位間の結合が通常の人よりも強くなっている) と new functional site 仮説 (現象に関わる固有の脳部位が存在する) の両側面から研究が展開されている。色聴についても双方の観点からアプローチしていきたいと考えている。

6. 参考文献

- [1] ジョン・ハリソン (2006) . 共感覚 もっと奇妙な知覚世界 , 新曜社 .
- [2] 長田典子, 岩井大輔, 津田学, 和氣早苗, 井口征士 (2003) . 音と色のノンバーバルマッピング 色聴保持者のマッピング抽出とその応用 信学論, J86-A(11), 1219-1230 .
- [3] V.S. ラマチャンドラン (2005) . 脳の中の幽霊ふたたび, 角川書店 .
- [4] Nunn, J. A., et al. (2002) . Functional magnetic resonance imaging of synesthesia: activation of V4/V8 by spoken words. Nat. Neurosci., 5(4), 371-375 .
- [5] 横井真一, 長田典子, 杉尾武志, 井口征士, 乾敏郎 (2005) . fMRI による共感覚計測: 色聴者の音楽視聴時の V4/V8 活動. 日本認知心理学会第 3 回大会.
- [6] <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>
- [7] <http://www.asahi-net.or.jp/~RP5T-HR/namisoku.html>
- [8] Zeki, S., and Bartels, A., (1999) . Measurement of cortical (in)activity, Phil. Trans. R. Soc. Lond. B 354, 1371-1382.
- [9] Hadjikhani, N., et al. (1998) . Retinotopy and color sensitivity in human visual cortical area V8, Nat. Neurosci., 1(3), 235-241 .
- [10] セミール・ゼキ (2002) . 脳は美をいかに感じるか, 日本経済新聞社 .
- [11] Chao, L. L., et al. (1999) . Cortical Regions Associated with Perceiving, Naming, and Knowing about Colors, J. Neurosci., 11(1), 25-35.