

色聴共感覚者の一貫性実験による クロスモーダルマッピング

蔡東生^{†1} 丁策立^{†1}

本研究では共感覚の一つ色聴という特殊な知覚現象に注目し、色聴共感覚の一貫性テストを行い、テストから得た音高、和音、調性データを分析し、音と色との結び付ける方法(クロスモーダルマッピング)を明らかにする。

Cross-modal mapping by sound-color synesthesia consistent test

DONGSHENG CAI^{†1} CELI DING^{†1}

This research is to focus on the sound-color synesthesia and analyze the cross-modal mapping of pitch, chord, key and color by the data from sound-color synesthesia consistent test.

1. はじめに

映画やテレビコマーシャルなどの作品に見られるように、音楽と映像、音楽と色彩など、複数のメディアが合わせて使われることがよくある。それは複数のメディアを扱うことで互いの印象を強め合うことができるからである [1]。音楽が加わることで映像の意味が明確に伝達されたり、映像作品がより印象的なものになったり、音楽の印象も映像が加わることでより感動的なものになる。また文学作品や映像などにも感性語を介さずに複数の印象を直接対応つける現象がある [2]。共感覚 (synaesthesia あるいは synesthesia) とは、音に対して色彩を感じる色聴など、一つの刺激に対して複数の感覚が同時に起こる経験である。共感覚を持つ人々は共感覚者と呼ばれ、多くは先天的なものだと考えられている。

共感覚は新生児が普遍的に持つと考えられている感覚であるが、脳の発達に伴う脳領野分化によって、大人になると失われてしまう。共感覚的なマッピングを一般の感覚保持者が持っている可能性は示唆されている。

共感覚の研究史は心理学が誕生した 19 世紀末に遡るが、共感覚という現象そのものは研究者や芸術家以外の人々にはほとんど知られていなかった。近年、共感覚は脳神経科学や心理学どの分野において注目されるようになっていくが、自然科学と人文科学の間で研究成果の交流はまだそれほど行われておらず、一般の認知度は低い、また数年前まで共感覚研究に携わってきた者はほとんどが非共感覚者であり、当事者である共感覚者の視点が欠けていたことに一因がある。それらの原因で共感覚を持つ人も自分がそういう特殊の知覚があるという事実も知らなかった。

近年、web 技術をもって大規模の共感覚者を集めることもできるので、web でテスト

(cavelab.cs.tsukuba.ac.jp/~gotoh/syneth/) を作って共感覚者のデータも集めることになれる。共感覚者と非共感覚者の間の橋渡しを目指す。

2. 研究の目的

本研究では共感覚の色聴という特殊な知覚現象を利用し、色聴共感覚者の一貫性テストから頂いた音高、和音、調性データを集め、まず高得点の色聴知覚を持つ被験者の色データを分析し、次は全体的に一貫性による音に対応する色データが基本色彩色との関係を解析してみる。次は音と色のクロスモーダルマッピングを明らかにする。クラスタリングから得られた共感覚色を用いて「ファンタジア」に使われる色とある程度の類似が見られた。

3. 共感覚と色聴

3.1 共感覚とは

共感覚とは、1 つの感覚の刺激により、別の知覚が無意識に引き起こされる知覚現象である。共感覚の表現がたくさん種類がある。例えば文字にカラフルな色を感じることや音に色を感じることもまたは味に形を感じることである。共感覚はある感覚が刺激源となり、他の感覚が刺激された結果となる特別な現象である。共感覚は一般的な感覚を持つ人には感じられない、共感覚者個人が主観的に知覚している現象である。

神経学者の Richard E. Cytowic による共感覚は次のような五つの特徴があることを明らかにした。

- ① 共感覚は不随意的だが、誘引されるのは間違いない。

^{†1} 筑波大学
Tsukuba University

- ② 共感覚は投影される。空間的な広がりがある。
- ③ 共感覚は一貫性があり、単純で、具体的である。
- ④ 共感覚は記憶に残る。
- ⑤ 共感覚は情動的、認識的である。

また、共感覚の発生原因ははっきりと分かってはおらず、いくつかの説が存在する。

- ① 共感覚は、実際は私たちが誰でも持っている正常な脳機能なのだが、その働きが意識に上る人が一握りしかない。
- ② 新生児の脳は生後3ヶ月ほどまで皆、共感覚を有している。
- ③ 幻肢の理論である交差配線(クロス配線)を共感覚に応用したものである。

共感覚の報告例は古くからあるが、主観的な知覚であるため、個人の思い込み、錯覚、幻想と見なされ、科学的な対象とは見られてこなかった。しかし、SPECT、fMRI、PET等の脳機能画像診断技術が発達し、共感覚を感じている時の共感覚者の脳機能に一般人とは違う反応が見られることが確認されるにつれ、その存在は否定できないものになってきている[1][4]。しかしながら、共感覚のメカニズムはまだほとんど明らかになっておらず、2つの感覚の対応関係についても、調査数が少ないため、未知な部分が多い。

また、共感覚の種類によって持つ人の割合は大きく違うが、共通して圧倒的に女性に多いということが報告されている。なお、芸術家には普通の人より七倍また八倍多く出現することもある。共感覚の中でも、「文字に色を感じる」共感覚や、「音に色を感じる」共感覚は比較的たくさんいると考えられている。

3.2 色聴とは

様々な種類がある共感覚だが、「音を聞くと色を感じる」感覚に対しては、色聴という特別な呼び名がある。色聴は共感覚の中でも発生確率が高いと報告されるので、特別な名前がついた。

例えば、「単語や文字の発音を聴くと色が見える」や、ドレミファソラシドなどの「音階や調性音を聴くと色が見える」など、様々なタイプの色聴が存在している。前者は「A」という文字や「てすと」という単語の発音に対して色を感じ取り、後者は「ハ長調(C)は赤、イ長調(A)は緑」といったように、音階や調性に対して色を感じ取る。例えば、ロシアの作曲家スクリャーピンはハ長調(C)は赤、イ長調(A)は緑、同じくリムスキー・コルサコフはハ長調(C)は白、ニ長調(D)は黄という具合に色を感じていたようである。

なお、先行研究により、色聴における以下のことが報告されている。

1. 色聴者の音と色のマッピングを一般的な感覚保持者が潜在的に有している可能性がある。
2. 調について、色相と強い相関がある。

3. 音色について、高調波成分が増えると色の彩度が上がり明度が下がる傾向がある。

4. 調性とその主和音に、また主和音がその根音に影響を与えていると考えられることから、調性を中心とした認識プロセスを経て、音を聞いている可能性がある。

3.3 クロスモダリティ

人間の知覚表象は、複数のモダリティに入力される感覚情報が相互作用・統合されることによって構築されている。このことを裏付ける代表的な現象として、マガーク効果(McGurk & MacDonald, 1976)が挙げられる。マガーク効果は、視覚情報が聴覚における音声知覚に影響を及ぼす知覚現象である[5]。図1に示す有名な実験もこういう現象を証明している。

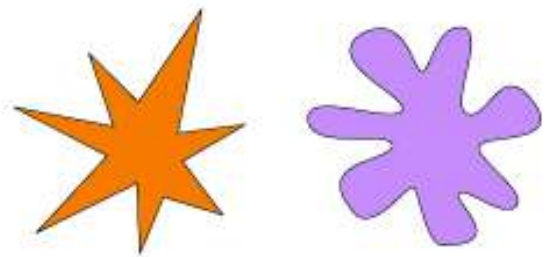


図1 ブーバ・ギギ実験

それぞれギザギザの直線と丸い曲線とからなる2つの図形を被験者に見せる。どちらか一方の名がブーバで、他方の名がキキであるといい、どちらがどの名だと思いかを聞く。すると、98%ほどの大多数の人は「曲線図形がブーバで、ギザギザ図形がキキだ」と答える。しかもこの結果は被験者の母語にはほとんど関係がなく、また大人と幼児でもほとんど変わらないとされる。この現象とは、言語音(聴覚)と図形の視覚的印象との連想について一般的に見られる関係をいう。複数の感覚繋がっている現象の一例。

このようなモダリティ間における相互作用は、視覚・聴覚に限らず、共感覚のいろんな種類においても同様に生じることが明らかになっている。これらの視覚現象は「クロスモーダル知覚」と呼ばれる。本研究は色聴共感覚による色(視覚)音(聴覚)のモーダルマッピングを解明してみた。

4. 色聴共感覚一貫性テスト

4.1 音源

本節では色聴共感覚テストが利用した音源の種類を記述する。

実験には、音高(PITCH)、和音(CHORD)、調性(KEY)の三種を用意する。音は同研究室の先行研究から継承したMIDI(General Acoustic Grand Piano・普通のグランドピアノ)を使用するもの。

4.1.1 音高

音高とは音の高さ。音楽では基音の周波数のような絶対

的な基準に基づいた高さを、特に絶対音高と呼ぶことがある。音高にはドレミファソラシの七種類の音を「C(ハ) C#(嬰ハ) D(ニ) D#(嬰ニ) E(ホ) F(ヘ) F#(嬰ヘ) G(ト) G#(嬰ト) A(イ) A#(嬰イ) B(ロ)」の12種類に分類し、それらにC+(Cの周波数の二倍)を加え、13種類の音高(表1)を音高テストの項目として行う。

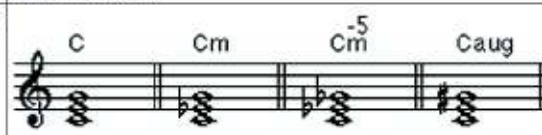
表1 音高の項目

項目数	13
項目名	C C# D D# E F F# G G# A A# B C+
例	

4.1.2 和音

和音とは、高さが異なる複数のピッチクラスの楽音が同時にひびく音のことである。三つのピッチクラスからなる和音を「三和音」、四つのピッチクラスからなる和音を「四和音」などと呼ぶ。和音のベースになる音を根音という。テストでは基本的に主和音(トニック)、属和音(ドミナント)、下屬和音(サブドミナント)に構成される主要三和音を扱う。

表2 和音の項目

項目数	24
項目名	Major: CEG GBD DF#A AC#E EG#B BD#F# F#A#C# D#FAb AbCEb EbGBb BbDF FAC Minor: ACE EGB BDF# F#AC# C#EG# G#BD# D#F#A# BbDbF F#bC CEbG GBbD DFA
三和音の例	

4.1.3 調性



図2 五度圏

メロディーや和音が、中心音と関連付けられつつ構成されているとき、その音楽は調性があるという。伝統的な西洋音楽において、調性のある音組織を調(ちょう、key)と呼ぶ。狭義には、伝統的な西洋音楽において、全音階の音から構成される長調(major key)と短調(minor key)の2

つの調が知られ、総計24種類がある。調性空間の一つの例が五度圏(図2)である。12の長調のなかから任意の調を選びだし、それを出発点にして、そこから時計回りに完全五度の関係にある調を順番に配列していくと、12の長調からなる円を作ることができる。さらに、円の内側に各々の平行短調を書き加えて、使用の便宜を図っている。

4.2 GUI

色聴一貫性テストのGUIを図3に示す。



図3 色聴共感覚の一貫性テスト GUI

共感覚の研究に伴い、テストのGUIも要求に合わせるために毎年変わる。音高、和音、調性テストは以下のGUIで行う。テスト背景は色覚に影響が少なくなるようニュートラルグレーを用いる。

テスト終わった後はPHPによる簡単なアンケートを実施した。アンケート内容は「年齢、性別、音楽始めた年齢、絶対音感の有無、色聴があるか、自由コメント」である。

4.3 実験の流れ

- 1、まず、最初の画面で「テストスタート」ボタンを押すと、図のようなテスト画面が出てくる。
- 2、初めに音が流れる(音が鳴っている間はボタンが押せない状態)。
- 3、見えた色に対応する色を左のカラーピッカーから選択してもらう。右の楕円が選択した色を示す。毎回に一色しか選択できない。
- 4、色を選択すると、決定ボタンを押した後、質感のポップアップが飛んでくる。選択した色がどんな質感を感じるかこのポップアップにて選択する。複数の選択肢ができる。そして感じられない場合「なし」も結構。別の感覚即ちポップアップに書いてない質感も「その他」の部分で自由に書ける。
- 5、色や質感には変更することができる。色の場合は「色を選び直す」、質感の場合は「編集」ボタンを押すと、変更できる。

- 6、「音再生」はもう一度音を聞ける。
- 7、音を聞くとき、色が見えない場合に対して、「色は見えない」ボタンを押す。そうすると、直接次の音に進む。
- 8、色の選択が完了したら、「この色で決定」ボタンを押してもらおう。次の音に進む。
- 9、全項目が終わった後、判定結果が出てくる。
- 10、結果のページで他のテストも受けるか図のアンケートへ進むかの選択がある。
- 11、アンケート終了後、全テストが終わり、すべてのデータがサーバに記録される。

4.4 色の一貫性

先行研究[3]では RGB 数値をもって一貫性を計算した。色文字共感覚とは違い、色聴共感覚者は音を聞くとき、体の外空間で色が見える(脳に感じられるタイプもある)ため今回は LAB という人の肉眼の色識別域に近似する立体色空間で実験データの一貫性を計算した。

テストからもらったデータについて説明する。三つの実験において PITCH は 13 種類、和音は 24 種類、調性は 24 種類の項目がある。項目ごとに色を三回の選択がある。この三回選択した色の色差を計算する。

色データの色差を計算するため、まず RGB から LAB に変換する。次は CIEDE2000 色差計算式を使う。CIEDE2000 は以下の計算式に示す。

$$\Delta E_{2000}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{S_H}\right)^2 + R_T \frac{\Delta C}{S_C} \frac{\Delta H}{S_H}}$$

CIEDE2000 色差式では、CIE Lab (L*a*b*表色系)の立体色空間上での人の目の色識別域に近似するように計算式を定義している。具体的には、明度差 ΔL^* 、彩度差 ΔC^* 、色相差 ΔH^* をもとに、重係数 S_L 、 S_C 、 S_H で重み付けを行う。重係数 S_L 、 S_C 、 S_H は、明度 L^* 、彩度 C^* および色相角 H^* の影響が加味されており、CIE Lab (L*a*b*表色系)の色空間上での人の目の色識別域の特長、1)彩度依存性、2)色相依存性、および、3)明度依存性を考慮した計算式となる。

各項目に対して、三つのデータが両々の色差を計算し、総和(以下の計算式に示す)を最後の Difference score にする。

$$v_j = \Delta E_{12} + \Delta E_{13} + \Delta E_{23}$$

j は各項目の順番であり、 ΔE_{12} は項目 j に一回と二回の選択の色差という形で定義された。

最終的には、各種類テストの一貫性はすべての項目の Difference score の総和である。次の式で示す。

$$V = \frac{\sum_j v_j}{N}$$

N は各テストの項目の数量である。Difference score の低い場合は被験者が近い色を選択したということを示され、一貫性が高い人と認める。低い場合は高得点被験者と呼び、逆に高い場合は低得点被験者と呼ぶ。

5. テスト結果により分析

5.1 被験者

色聴共感覚者の色聴知覚現象は人により強い人か弱い人もいる。一貫性は共感覚の一つの特徴であり、ある刺激からもたらした感覚は一生変わらないことがある[6]。この基準に従って誰が強いクロスモーダル感覚を持つ共感覚者が分かる。

2012 年末まで、先行研究のデータを含め、色聴一貫性テストに参加した実験者の人数が表 3 に示す。

表 3 実験者概要

	音高 (PITCH)	和音 (CHORD)	調性 (KEY)
実験者人数	82	38	81
男女比			
年齢比			

三つの実験人数からみると、和音テストをやった人がよほど少ない。普通の人々が音楽に関する知識が少ないため、和音の刺激から色が見える人がうまく説明できないもしくは見ることがすくないのではないかと考えている。また、問診調査と同じ趨勢であり、女性の方が圧倒的に多かった。

5.2 高得点被験者によるデータの分析

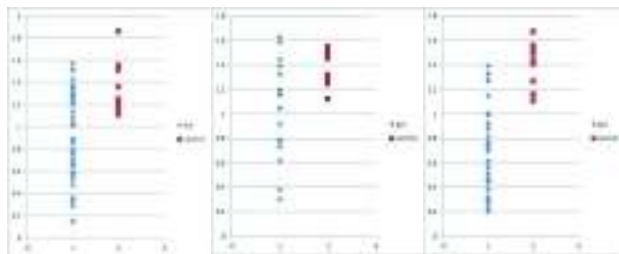
ここでは、色聴テストから得られたデータの解析について述べる。

色聴ウェブテストから色聴共感覚者のデータを取り、一方、高得点の被験者を区別するため閾値を決めないといけないので、比較の役としてコントロール者のデータも必要となる。

コントロールとは、共感覚を持たない即ち普通の人達が色聴テストを共感覚者と同じ手順で音を聞きながら色を選択することである。彼達にとって色が見えない故、音を聞くとき初めて連想した色を選択するという指示に遵守

し、コントロール実験を実施していただいた。国籍による誤差を除くため今回の11名のコントロールは全員日本人。

一貫性による統計結果を説明する。図4.1には音高・和音・調性三つの実験から頂くそれぞれ被験者全員のDifference Scoreが示される。図の縦軸は各被験者のDifference Score値であり、横軸は共感覚被験者(青い菱形)とコントロール被験者(赤い四角形)の二つのタイプのデータが並ばれる。



音高 (PITCH) 和音 (CHORD) 調性 (KEY)

図4 Difference Score

共感覚をどのように感じているかについても個人差がある。現実の空間に色が付いて見えたりするように共感覚を感じる「プロジェクタ」(Projector)と呼ばれるタイプと、「心の目」に色や形などの共感覚を感じる「アソシエータ」(Asociator)と呼ばれるタイプの共感覚者がいる。色が見えないかどうか共感覚者の判断基準としてはいけないので、ここで色聴被験者とコントロール者と比較し、共感覚テスト被験者のDifference Scoreの閾値を決め、高得点被験者という集団が選ばれる。図4により、三つの音対象にとってコントロール者の一番低いDifference Scoreは全部1.1当たりとなり、共感覚被験者の閾値も先行研究[4]と同じ1.0に決定する(三つの種類がなぜ全部1.1あたりになるかは不明。三つの項目においては、1.1を選じた人は同じ人ではないので、偶然だと考えている。別のコントロール者にすると1かもっと低い得点に下がるかもしれない)。

Eaglemanの研究より「文字一色」の閾値も1に設定したことであり、「音一色」も同じ閾値に接近することを示唆している。そして、本研究ではDifference Scoreの1以下のデータを選択し、高得点被験者と呼ばれる色聴共感覚者のクロスモーダルな感覚のマッピングを解析する。まず、若干の個人データに注目し、色聴のクロスモーダルマッピングを分析する。

個人分析は五度圏の配列によりCを頂点として時計回りのように並べている。外側は長調、内側は外側に対応する平行調の短調である。各調に対して三回の色データも刺激の順番で並ばれる。一回から三回までのデータは円のサイズの収縮順にしたがって描く。

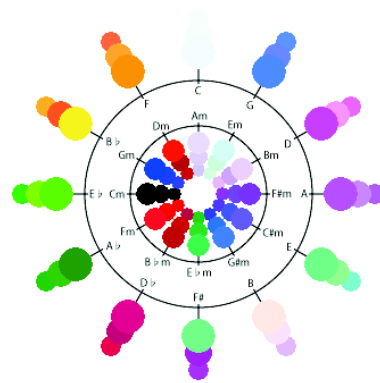


図5 KEY Difference Score = 0.3277

図5において、この被験者のデータは相当な関係性が見られる。先行研究の「ハ長調(C)は白」と同じである。そして、この人の五度圏からみると、隣接する調の色が二つずつ大分同じ色相に見られる。長調も短調もこういう傾向がある。しかも同主調の長調と短調の色相は一致しているもしくは色相環上で隣接している存在、即ち近い色相が見られるが、多少明度が違い、短調の方は長調より暗い。

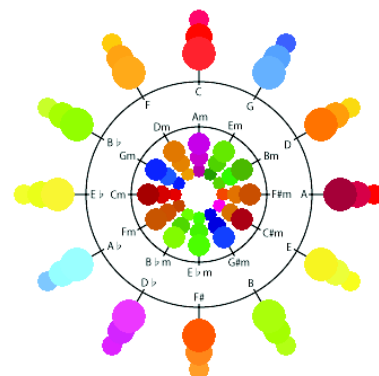


図6 KEY Difference Score = 0.2875

各調に対応する色は一つではないが、先行研究には「ハ長調(C)は赤」という記載もあったが、おそらく赤と答える人は上図のように赤で始まる五度圏データを持っていると考えられる。この被験者がほぼ赤、緑、青と黄を選択したが、第一人より長短に関わる明度の違いがはっきり見られる。短調の方が暗くなった故、例えばF短調の色が濃い黄色むしろ茶色となった。

もし五度圏の順番を少し変え、五線譜の順番に従って改めて分布すると、図7に示されたように長調と短調は明度が違うが、同じ色相に見られる。しかも五線譜の音の順番で隣の色と近くなる。五線譜において隣の音の音程は一度。だからこの被験者が何個ずつペアにして音を区別しているかと考えられ、この習慣も色に表現されたと思う。

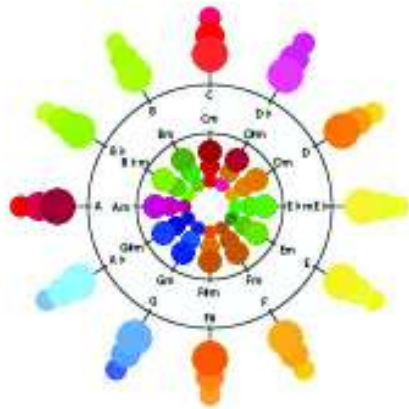


図7 KEY Difference Score = 0.2875 五線譜の順番
 次は低得点の被験者とコントロール被験者のデータを
 各種類に一人ずつの分布を以下図に示す。

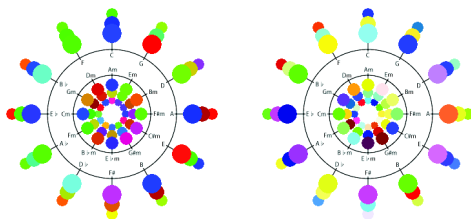


図8 KEY Difference Score = 1.5693
 KEY Difference Score = 1.2459

以上のデータが全部低得点の被験者だが、コントロール被験者の選択した色から関連性など一切見えない。左の被験者が低得点だけど、少しだけの一貫性が見える(F,C,Em,Dm,Bm)。

5.3 データと基本色彩色の比較

本節では色聴テストによって得られた色データと基本色彩色の相関関係を分析する。

基本色彩語 (BASIC COLOR TERMS) とは日常生活のコミュニケーションの手段として最も基本的な色単位に分類したものである。すなわち、ある限られた範囲の色に与えられた固有の名前ではなく、色空間全体をいくつかの色名で概念的に把握するための言葉であり、多くの者が幼少時に文化的背景に応じて最初に覚える色の名前である。1969年にアメリカの文化人類学者 Berlin と言語学者 Kay によって発表された報告によれば、さまざまな言語圏において共通する2個から11個の基本色彩語が存在する[7]。彼らは98種の言語を比較し、言語によって基本色彩色の数とその色の範囲が異なること、言語の進化によって基本色彩色が分化し増えてゆくことなどを見出した。そして各言語にある色名単語を調べた結果として色がそれぞれの民族の文化発展及び言語体系に応じて導入される順序は「黒、白、赤、緑、黄、青、茶、紫、橙、ピンク、灰」ということを明らかにした。「黒」と「白」は最も基本的な分類だが、インド

ネシアなどの島にある民族がこの二つの基本色のみ使って明暗を区別する。もし三つしか持っていない言語ならば「赤」が加える。次に導入されるのは「緑」または「黄」、言語によってどちらの可能性もある。続いて「青」、その次は「茶」とされ、最後は「紫」、「橙」、「ピンク」、「灰」のいずれかが入る。そのため、全部7種類の進化ステップがこの世界に存在している。日本語は11種類の基本色彩語を持っている。分布は World Color Survey から色データをもらって作った(付録1)。

日本語の基本色彩語の種類は「黒」、「白」、「赤」、「緑」、「黄」、「青」、「茶」、「紫」、「橙」、「ピンク」、「灰」(「桃」は「ピンク」である)という11種類がある。図4.1の色彩図はマンセルの立体色空間から変換した二次元色彩図。縦軸は明度(value)、横軸は色相(Hue)であり、すべての色が最大限の彩度(Chroma)が持っている。別の色彩図とは違い、この図は連続の色空間ではなくすべての色が330の四角形に分割して形成したもの。一番左の部分が無彩色の白から黒になる変遷、中心の部分は灰色。他の部分は有彩色である。上にマックした漢字のとなりにある数字はこの色に属する四角形の数、すなわち各色は黒い線に囲まれた部分である。

そして本研究は特に日本語の基本色彩の分布に注目し、色聴共感覚一貫性テストの色データが基本色彩語とはどんな関係で対応しているかもしくは近似な分布かを分析する。

5.3.1 提案手法

Berlin 達作った日本基本色彩色の分布は MUNSSELL GRID が背景として表した。色聴テストから得られた色データは HSV カラーピッカーから選択した結果であるので、色背景が違う。そして今回は MUNSSELL GRID と同じ分割方法を使って横軸41等分(無彩色も含める)縦軸は10等分の分割方法にして HSV GRID を作った。WCS(World Color Survey)からの MUNSSELL GRID の各代表色の LAB 値を HSV 値に変換してから日本基本色彩色の分布を HSV GRID に移動した。不規則な立体色空間の MUNSSELL と円錐体色空間の HSV の間に同じ色の定義方法だが、各 GRID の色範囲は若干違いがあるため、MUNSSELL 上に連続した日本基本色彩色の分布は HSV に変換すると、中間の緑、青、紫の分布が不連続になる及びピンクと赤が重なる部分もあり、GRID の数量も減ってしまうけど、分布は主に MUNSSELL と同じ状況が見られる。日本基本色彩色の色分布と高得点色聴共感覚者およびコントロール被験者の音において色分布を Earth Mover's Distance[18]という距離尺度を用いて比較するという手法を提案する。

Earth Mover's Distance (EMD) は、ユークリッド距離のような距離尺度の一つで、二つの分布の間の距離を測ることができ、画像処理や音声処理では比較的有名な距離尺度である。類似画像検索の分野でよく用いられている[19]。EMD を求める際、二つの分布 (P と Q にする) はシグネチ

ヤとして表現される．分布（たとえば P）をシグネチャで表現すると

$$P = \{(p_1, w_{p_1}), \dots, (p_m, w_{p_m})\}$$

となる．分布 P は m 個の特徴量（Q は n 個と設定する）で表現されており、 p_i は特徴ベクトル、 w_{p_i} はその特徴量に対する重みである．ここで p_i と q_i の距離を d_{ij} に表し、特徴量がベクトルのときはユークリッド距離である．EMD は特徴量の集合が一個一個の特徴量の距離をもとに、特徴量集合の最適化の距離を求められる．

f_{ij} は p_i から q_i への輸送量で、評価関数は下に示す．

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij} d_{ij}$$

この評価関数も次の四つの制約に従って最小になるような輸送量を求める．

- (1) $f_{ij} \geq 0 \quad (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n)$
- (2) $\sum_{j=1}^n f_{ij} \leq w_{p_i} \quad (1 \leq i \leq m)$
- (3) $\sum_{i=1}^m f_{ij} \leq w_{q_i} \quad (1 \leq j \leq n)$
- (4) $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij} = \min(\sum_{i=1}^m w_{p_i}, \sum_{j=1}^n w_{q_i})$

そして、P と Q 間の EMD は以下の式で計算する．

$$EMD(P, Q) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} f_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij}}$$

従来のヒストグラムによる色分布表現では、ヒストグラムのビンが固定であるため表現力が不十分であり、またヒストグラム間の比較尺度が人間の感覚に合わないことがあるといった欠点である．シグネチャの場合は対象に応じて要素数、ビンの代表値を変えることができ、柔軟な表現が可能である．また、EMD は他の尺度より人間の感覚に近いことが報告されている[18]．

5.3.2 データと基本色彩色の比較 (EMD)

今回の研究では、長調の調性に対応する和音に注目して分析した．色聴テストからもらった音高・和音・調性の色データと日本基本色彩色の分布が全部 HSV GRID に分布し、各 GRID の色の代表値を特徴ベクトルとして、代表色の確率（属した色データの数/色データの総数）が重みとして各自のシグネチャを作った．共感覚者とコントロール被験者に対して六つのシグネチャを持つ、一つずつ日本基本色彩色のシグネチャと EMD 値を計算する．

表 5-1 各項目と日本基本色彩色の EMD 値

項目	日本基本色彩色
共感覚者音高	0.5777
共感覚者和音	0.5737
共感覚者調性	0.5150
コントロール者音高	0.7874
コントロール者和音	0.7192
コントロール者調性	0.6105

結果より、同じ項目に関しては、共感覚者と日本基本色彩色の距離はコントロール被験者より小さい．各項目の差が若干違う程度がある．音高と和音の場合は明らかに差が見られる (0.2097&0.1455) が、調性の場合が一番小さく (0.0955) がある．それがすべての人にとって調性の方が一番知られた存在ではないかと考えられる．その事実もある程度で共感覚の共通性を証明された．そして調性の分布が一番日本基本色彩色の分布に近いものと見られる．しかしながら、これらの数値はただ共感覚者の色分布はコントロール被験者即ち一般人より基本色彩色の分布に近いと判断できるが、どれほどの近さが存在しているかまだ分からない．そしてこの二つの群の差がどれだけの距離があるかが別の検討をしないと行けない．

5.4 高得点被験者における音高・和音・調性の関係

音高・和音・調性それぞれの高得点群における各音刺激について、k-means 法を用いて、代表色を抽出した．ただし、各音刺激に対応する色が 1 つに収束する必然性がないことから、複数に分色した中で、属する要素の多い上位 3 色について図 9 に示した．また、3 パラメータはそれぞれ、必須条件 1 4 調とその主和音、その主和音の根音である．

さらに、調性、主和音、根音間の Lab 空間上における色差が、 $d(\text{音高, 和音}) < 50 \wedge d(\text{和音, 調性}) < 50 \wedge d(\text{調性, 音高}) < 50$ となる部分を抜き出したものを図 10 に示す．

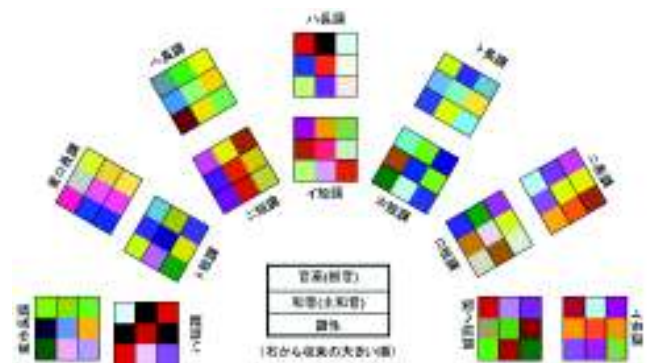


図 9 高得点被験者における音高・和音・調性の関係

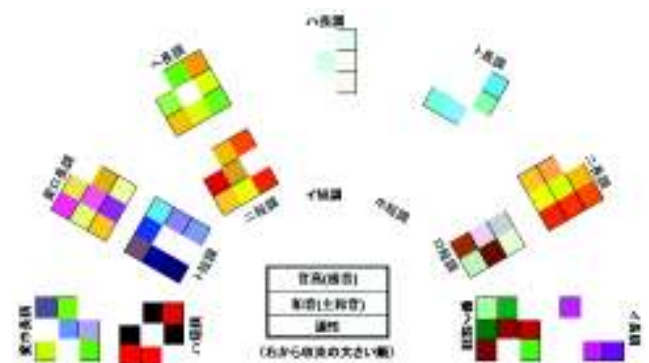


図 10 高得点被験者における音高・和音・調性の関係（高相関）

上図より、音高・和音・調性間にある程度の色の類似が見られた．たとえば、八長調は白、七長調は水色、六長調

は黄色や緑、橙である。このことから、調性はその主和音に、また主和音がその根音に影響を与えていることが推測される。

また、先行研究より示唆された色聴における音のパラメータの優先度が『調性>音高>音色』であること、さらに主要三和音が調性を決定づける要素であること、5.2で示したように、音高の色聴はどの調性(和音)に属しているかという認識によって変化する可能性があることから、調性を中心とした認識プロセスを経て、音を聞いている可能性がある。

6. おわりに

本研究では共感覚の色聴という特殊な知覚現象を利用し、色聴共感覚者の一貫性テストから頂いた音高、和音、調性データを集めた。テストの結果から高得点の色聴知覚を持つ被験者の色データを特別に分析し、色聴共感覚というクロスモーダル感覚の対応関係の一貫性が見られた。そして、色聴共感覚高得点被験者の色データが一般人より基本色彩色の分布に近いということもわかった。次は基本色彩色に基づく音と色のクロスモーダルマッピングを明らかにし、各項目に音高・和音・調性の共通性も見られ、また長調と短調の共通性も示唆された。

参考文献

- 1) 岩宮真一郎: 音楽と映像のマルチモーダル・コミュニケーション,九州大学出版会(2000)
- 2) 北村紗衣: 感覚のマイノリティ—共感覚と共感覚のめぐるフィクション,表象文化論学会第4回大会京都造形芸術大学研究パネル4 感覚(2009)
- 3) David M. Eagleman, Arielle D. Kagan Stephanie S. Nelson, Deepak Sagaram, Anand K. Sarma : A standardized test battery for the study of synesthesia(2006)
- 4) 後藤祥一: 色聴感覚を用いた音と色のノンバーバルマッピング,筑波大学修士論文(2010)
- 5) 潮田浩: 視覚・触覚間における運動情報のクロスモーダル統合 (2008)
- 6) Simner : Defining synaesthesia, British Journal of Psychology 103 (6): 1-15(2012)
- 7) Berlin, Brent; Kay, Paul (1969) : Basic Color Terms: Their Universality and Evolution, University of California Press(1969)
- 8) 志津綾香、松田真一: クラスタ分析におけるクラスタ数自動決定法の比較, 南山大学大学院数理情報研究科数理情報専攻, 南山大学情報理工学部情報システム数理学科 (2010)
- 9) 藤稿航平: 色空間の曲率に関する考察とその応用(2010)
- 10) 高橋理宇真, 藤澤隆史, 長田典子, 杉尾武志, 井口征士: fMRIによる共感覚の計測—色聴者の音楽聴取時の脳活動—, 情報処理学会研究報告 2006-MUS-66, 105-108(2006)
- 11) David L. Macadam : Visual sensitivities to color differences in daylight, Research Laboratories, Eastman Kodak Company, Rochester, New York (January 7, 1942)
- 12) 長田典子, 岩井大輔, 津田学, 和氣早苗, 井口征士: 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ルール抽出とその応用—, 電子情報通信学会論文誌 A, J86-A (11), 1219-1230(2003)

- 13) 王軍棚: 共感覚における音と色のクロスモーダリティ, 筑波大学修士論文(2012)
- 14) 宮本定明: クラスタ分析入門—ファジィクラスタリングの理論と応用, 森北出版 (1999)
- 15) 新納浩幸: Rで学ぶクラスタ解析, オーム社 (2007)
- 16) Julia Simner & Jamie Ward: Synaesthesia, Color Terms, and Color Space, Psychological Science, Vol19(4), 412-414(2008)
- 17) Simner, J., Ward, J., Lanz, M., Jansari, A., Noonan, K., Glover, L., Glover, L., & Oakley, D.A.: Non-random associations of graphemes to colors in synaesthetic and non-synaesthetic populations. Cognitive Neuropsychology, 22, 1069-1085, 2005
- 18) 井上泰助: 共感覚を用いた音楽と映像のノンバーバルマッピング, 筑波大学修士論文(2008).
- 19) Yossi Rubner, Carlo Tomasi, and Leonidas J. Guibas : The Earth Mover's Distance as a Metric for Image Retrieval, Computer Science Department, Stanford University Stanford, CA 94305

付録

付録 A.1 MUNSELL GRID 上に日本基本色彩色の分布

