

博士学位論文

共感覚の処理過程の解明 ：色字共感覚および色聴共感覚

李 珠暉

女子美術大学大学院 美術研究科 芸術文化専攻 色彩学研究領域

共感覚はある一つの感覚様相の刺激が異なる感覚様相を自動的に引き起こす現象であり (Richard E. Cytowic, David Eagleman, 2009), 本来刺激がもたらすべき感覚と異なる感覚を随伴する. 色字共感覚は文字や数字に, 色聴共感覚は音楽や話し言葉に対して自動的に色の感覚が引き起こされる現象であり, 物理的な光に対する色知覚は非共感覚者の色知覚と大きな差異がないと考えられるが, 文字や数字を見た時に物理的的刺激と異なる色を知覚することができる.

僅か10年前までは共感覚の発生レベルについて研究分野を問わず, 低次レベルによる共感覚と高次レベルによる共感覚に二分して提唱されていた (Dixon, Smilek, Merikle, 2004; Martino & Marks, 2001; Ramachandran & Hubbard, 2005; Ward & Mattingley, 2006). しかしながら最新の研究では共感覚は一つの要因で誘発される現象ではなく, 複数の要因が絡んだ複雑な現象であるという見解が出ている (Smilek et al., 2007; Watson et al., 2012). 今日多くの研究者は共通した特徴を持つ刺激に同一あるいは類似した共感覚色が誘導されるのであれば, その特徴が原因であるという考えで検証している (Beeli et al., 2007; Witthoft & Winawer, 2003).

色字共感覚は同一の言語 (Brang et al., 2011, Watson et al., 2012) のみならず異なる言語 (Witthoft & Winawer, 2006) でも形態が類似すれば共感覚色も類似するということが知られている. 例えば異なる文字種でありながら幾何学的特徴が類似する「数字0」と「英文字0」に対して同じカテゴリーの共感覚色が生じたという報告がある. 文字認識は形態情報のみで成り立つのではなく, 刺激を文字として認識する場合必ず付随する要因の一つとして発音を挙げることができる. 平仮名と片仮名のように同じ発音を持つ異なる形態の文字 (Asano & Yokosawa, 2011) や同

じ発音を持つ異なる言語の文字(Witthoft & Winawer, 2003)に対して類似した共感覚色が誘導されるということは形態的情報より音韻的情報によって共感覚色が決定されることを示唆する。ただし単文字に意味が内包されている表意文字の場合、色名や物体色を連想しやすい文字刺激(e.g., 血, 桜)に対して全ての被験者が同じ色相の共感覚色を経験したという報告(Asano & Yokosawa, 2012)から考えると、共感覚は意味の影響も受けている可能性が示唆される。

色聴共感覚は非言語的なノイズ(Myers, 1911)や話す言葉(Baron-Cohen, 1987)のみならず、同一の周波数を持つ純音(Goller, 2008)によっても誘導された。和音により誘導される共感覚色は単音の共感覚色に比べて共感覚色の種類が増加し(Ward et al., 2006)、共感覚色の明るさは音階の高さと共に変化した(Marks, 1978; Ward et al., 2006)。刺激の物理的变化によって特定な共感覚色の見えが変化したことは共感覚色が相対的に低次レベルの影響を強く受けることを示唆する。このように共感覚色は様々な特徴により生じる現象であるが、共感覚色の類似性がどの要因により誘導されるかについては特徴ごとに研究者間で見解が異なっている。

本研究では共通した共感覚色を経験する異なる感覚様相の共感覚(色字共感覚、色聴共感覚)を使用して類似した共感覚色が誘導されると知られている要素の情報を比較することで、共感覚の色知覚が誘導刺激のどの情報処理レベルで相互作用を生じるのかを明らかにすることを目的とした。

(1) 色字共感覚の被験者は色覚正常である女性3名(IT, MT, AH)であり、彼女らは3種類の日本語表記および数字、そして英語に対して共感覚色を経験していた。なお共感覚の経験における分類(Dixon et al., 2004)によるとITとMTは外部の空間に知覚するprojectorのタイプ、AHは文字から色を連想するように共感覚を経験するassociatorのタイプである。

実験は暗室内にある標準光源ブースの色検査評価用D₆₅蛍光ランプの下で行われ、被験者にランダムで呈示する刺激に生じた共感覚色と最も近い色をマンセル色票(JIS標準色票)から選択させた。実験は3回繰り返し、各実験間には約1ヶ月の間隔をあけた。

色字共感覚のメカニズムを検討するため文字における主要な3つの情報(形態、発音、意味)を手がかりとして表音文字と表意文字におけるそれぞれの情報を比較した。

表音文字による共感覚色は、形態情報によって必ずしも誘導されることではないが、形態情報より音韻情報によって強い影響を受け、母音と子音の両方が共感覚色の知覚に関与していた。

しかし異なる情報による共感覚色の色知覚はE. heringモデルの現象的反対色を軸にしたCIEL*a*b*色空間で特徴的な分布が示した。英文字「0」と数字「0」のように形態情報が同一である(条件①)共感覚色は他の刺激条件と比べて「黄-青」反対色に沿った分布が多いことをわかった。これは幾何学的情報が類似した文字において「赤-緑」反対色に沿った分布がほとんどないことを意味する。

一方幾何学的情報がほぼ同一であるにもかかわらず物理的変換を行った条件②と③の共感覚色には、「黄-青」反対色に沿った分布のみならず「赤-緑」反対色に沿った分布も示された。 a^*b^* の両軸において分布が現れたことは条件②と③では形態以外の異なる情報による文字認識が共

感覚色に影響を与えることを意味する。これらの結果から考えるとおそらく形態情報の処理は「赤-緑」反対色の処理過程、方向や対象性などの形態以外の情報処理は「黄-青」反対色の処理過程に関与すると考えられる。

表意文字による共感覚色も、形態情報により必ずしも類似していないことがわかった。これは共感覚色の類似性が形態情報だけではなくより高次で処理される文字情報によって影響を受けることを示す。また表意文字による共感覚色は音韻情報より意味情報によってより強い影響を受けていたが、音韻情報による類似性も見られた。これは表意文字による共感覚色が単語一色共感覚色と同様に意味情報に依存していることを示す。共感覚色が音韻情報より意味情報の優位性をもつ際は色名や感情などの普段色との連携性が明確な刺激においてである。これらの刺激では全被験者が同一の共感覚色を経験するほど意味情報と共感覚の色知覚間では密接な関係が示された。一方音韻情報や意味情報による共感覚も表音文字による共感覚色と同様に CIEL*a*b*色空間で体系的分布が示され、音韻情報による共感覚色は「黄-青」反対色に沿った分布が多いことがわかった。これは音韻情報の文字において「赤-緑」反対色にそった分布がほとんどないことを意味する。

反対色チャンネルの色知覚メカニズムは脳内での処理経路が異なり、「赤-緑」反対色の見えを担当する parvo cells は ventral 経路の情報処理に (Merigan and Maunsell, 1993), 「青-黄」反対色の見えを担当する konio cells は ventral 経路のみならず運動や時間情報を処理する dorsal 経路にも関与する (Casagrande, 1994; Hendry and Reid, 2000) と言われている。形態情報から得た音韻情報の処理は表音文字や表意文字のいずれも脳の ventral occipital-temporal で処理されると知られており (Thetae et al., 2010), この領域は ventral 経路を経ていると考えられる。このことから音韻情報により誘導された共感覚色は「赤-緑」反対色の見えを処理する過程に関連されている可能性が考えられる。

(2) 色聴共感覚の被験者は色覚正常である女性 2 名 (IH, TD) であった。TD は聴覚による大部分の情報に、IH は特定の音楽のみに対して共感覚を経験した。そのため被験者に合わせた同じ条件の異なる刺激を用いて実験を行った。

音楽における主要な 3 つの情報 (転調、テンポ、メロディー) を用いてそれぞれの情報を比較した結果、色聴共感覚はテンポより転調の変化によって共感覚の経験が大きく変化することがわかった。例えばオリジナル曲に対して下降音型になるほど vivid blue が占める面積は全刺激で増加したものの、上昇音型になるほど light yellow が占める面積は原曲を中心に増加し、vivid blue の共感覚色は消えていた。

色聴共感覚も刺激の変更により反対色相の「黄」と「青」に変動が現れたことから、共感覚色の色知覚は心理現象における色知覚のうち反対色を処理する段階以降であると考えられる。

このように色字共感覚と色聴共感覚の色知覚は CIEL*a*b*色空間の 2 軸に沿った体系的分布を示した。これは共感覚の色知覚が 2 対の現象的反対色知覚に基づいて処理されることを示唆する。

CIEL*a*b*色空間は共感覚色の解明において適切であるという提案もある (Thornley, 2006).

このように共感覚は E. Hering モデルを基にした色知覚の現象であると考えられ、反対色の特性に基づく一般的な色知覚と同様のメカニズムにより処理されることが考えられる.

反対色メカニズムは網膜から皮質に至る色知覚の階層的情報処理により形成され、各段階における反対色信号は異なることが報告されている.

共感覚の色知覚が 3 錐体の出力による拮抗型細胞の反応に依存して生起されるのであれば、共感覚色は各視細胞の分光感度のピークに相当する波長の色を中心に偏ると推察される. 視細胞の入力による LGN の反対色軸 (cardinal axes) は大脳の現象学的反対色相軸 (phenomenological color-opponent axes) と一致しないことが知られている (Krauskopf et al., 1982; Wuerger et al., 2005; Webster et al., 2000). 共感覚の色知覚が LGN における反対色情報処理に依存して生起されるのであれば、共感覚色は 2 つの現象的反対色と異なる色情報に沿った分布が示されると考えられる. 大脳の低次段階における色知覚は LGN より狭い範囲の色に特化して応答し (DeValois et al., 2000), 反対色性の情報は維持される (Mullen et al., 2007). この処理過程に対応する生理学的領域は V1 のみならず V2, V3 にわたる広い範囲である (DeValois et al., 2000; Lennie et al., 1990; Kiper et al., 1997). V4 が損傷した macaque を用いてカテゴリカル色知覚を検討した研究 (56) では赤, 緑, 黄, そして青の 4 色における色の分類 (color categorization) が可能であったと報告 (Walsh et al., 1992) され, 現象的反対色情報が V4 以前の段階において処理されることを示めている. これらのことから共感覚色の色知覚は大脳の初期段階における反対色情報処理に依存し, 少なくともこの段階以降から文字情報の処理過程と連携していると考えられる.

しかし本研究で得られた結果では形態情報や音韻情報, そして意味情報のいずれによる場合でも共感覚色は色カテゴリーに依存していなかった. 我々の日常の色経験のもととなる連続的な色知覚及びカテゴリカル色知覚は反対色情報が融合する大脳の高次段階において処理され, この生理学的領域は V4 と V8, そして IT (下側頭皮質) であることが知られている (Hadjikhani et al., 1998; Komatsu et al., 1992; Yoshioka et al., 1996). V4 は同じ波長のみに反応する特徴があること (Komatsu et al., 1992) から連続的な色知覚が処理されることが考えられ, IT 細胞は色相と彩度の狭い範囲に反応する色選択性の特徴を持ち (Hanazawa, 2000) その活動が色知覚と高い相関を示すことから, IT ではカテゴリカル色知覚を処理すると推察される (Komatsu, 1998). さらにカテゴリカル色知覚を含んだカテゴリ判断は IT のみならず, より高次の aIT (下側頭皮質前部) や PF (前頭前野) によっても処理される (鯉田, 2010; Roberson and Davidoff, 2000).

fMRI や PET を用いて共感覚の色知覚を検討した研究においては, 一般的色知覚の見えを担当する V4 領域の発火が報告されている (Bien, 2011; Leeuwen et al., 2010; Niccolai et al., 2012; 高橋 et al., 2006; Rich et al., 2006). さらに共感覚色の応答は V4 や V8 (高橋 et al., 2006; Nunn et al., 2002) を包含した ventral-occipital 色領域のみならず色の情報を含んだ高次の視覚的情報を処理する Left medial Lingual gyrus (左舌状回) (Rich et al., 2006) も発火した. 本研究の結果が得られた考察はこれらの結果と一致する.

以上のことから色字共感覚は文字認識の処理過程, 色聴共感覚は音楽認知の処理過程と色知覚の処理過程との間の多段階にわたる交互作用によって生じる現象であると考えられる。

共感覚の色知覚は非共感覚者の色知覚と同様なメカニズムにより処理されており, 文字認識の処理段階と交互作用を行う色処理段階は LGN 以降で現象的反対色を処理する大脳の低次段階からカテゴリーカル色知覚を処理する段階以前の間により処理されることが明らかになった。

付録

■ 色字共感覚

これは私が工夫して作ったエビフライ。

ローソンで口紅を買った。

アメリカと協力する+

イタリアの夕焼けはすばらしい！

図1 本実験で使用した刺激で、被験者 AH が経験している共感覚色

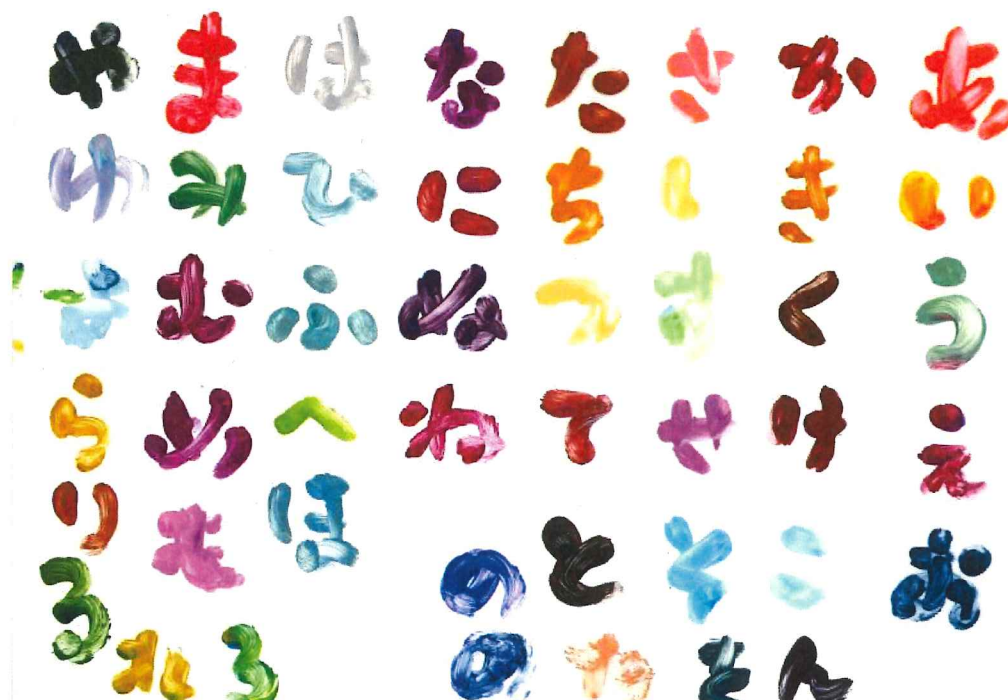


図2 平仮名に対する被験者 IT の共感覚色

■ 色聴共感覚

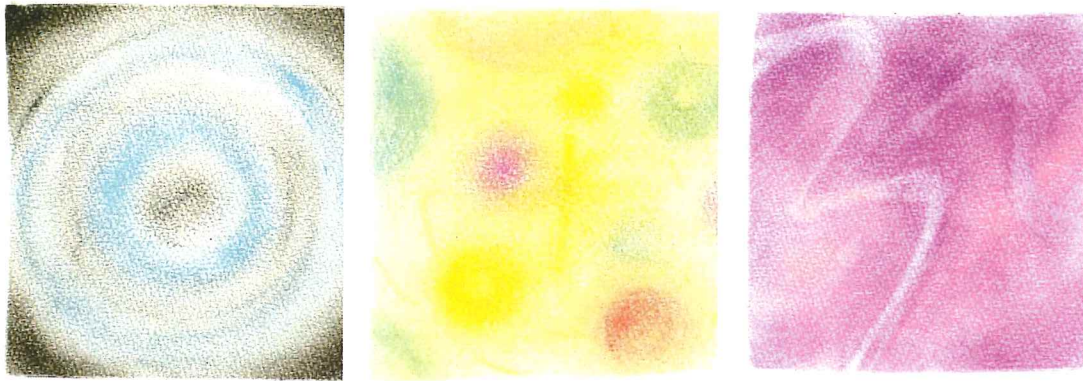


図3 被験者KTが経験している共感覚を絵描いたもの(地下鉄を載った際に見えた共感覚(左) ‘sound resonance’ という音楽を聞いた際に見えた共感覚(色々な球が中から外側へ広がっていく)(中) 音楽を聴いたり、お風呂でリラックスしている時に多く見る共感覚(右))

実際の映像



見えた色を含めた映像



図4 少し眠くなりながらぼうっと聴いていたところ、紫色が見えた。ベースの音に集中する程、紫が見やすくなった。(被験者ISのinterviewの中から)

最終試験の結果の要旨及び審査委員

(100字程度)

報 告 番 号	甲 第 21 号	氏 名	李 珠 睨
	氏 名		職 名
最終試験 担 当 者	主 査	坂 田 勝 亮	教 授
	副 査	淵 田 隆 義	教 授
	副 査	内 川 恵 二	教授 (東京工業大学大学院総合 理工学研究科)

(最 終 試 験 の 結 果 の 要 旨)

李珠睨さんの学位論文は共感覚と呼ばれる現象について、その発生機序の一部を解明したものと言える。共感覚は本来の刺激と異なる刺激によって感覚が生じる現象で、これまでの研究では現象記述や生理的反応について研究がおこなわれてきた。李さんはこれを人間の情報処理メカニズム全体の中に位置づけ、どの段階の情報処理どうしの交互作用によって生じるかを明らかにしようとしたものである。

研究は色字共感覚と色聴共感覚の2現象を扱っており、いずれも文字認識、聴覚認識の情報処理と色覚の情報処理との交互作用を心理物理的実験の条件分析手法により解明したものである。この人間の情報処理全体のメカニズムとして解明した例はこれまでになく、局所的視点に限って現象記述がなされてきたこの分野に新しい知見を示したことが高く評価された。また多くの先行研究を整理して刺激の条件分析を明確にし、併せて脳における色覚情報処理の知見に基づいてデータ分析を行った点も評価された。

審査委員からは本研究が心理情報処理メカニズムの解明にとって新たな知見をもたらすものかという質問があり、神経科学分野との相互関係から示される新たな知見について回答された。また最終的なモデルの精度についても指摘があり、今後の広範囲にわたる研究の必要性が重要であることが回答された。最終的に博士の学位を授与するに値する研究であるという点で、審査委員全員の意見が一致した。