

## 文字の形態情報や音韻情報による 色字共感覚の色知覚メカニズムの解明

李 珠暎\*・坂田 勝亮\*\*

\* 女子美術大学 大学院美術研究科

\*\* 女子美術大学 芸術学部

〒252-0328 神奈川県相模原市南区麻溝台1900

(受付：2013年10月30日；受理：2014年2月26日)

## The Identification of a Color Vision Mechanism in Grapheme-Color Synesthesia that is Modulated by Visual Forms and Phonological Information

JuHyun LEE\* and Katsuaki SAKATA\*\*

\* Graduate School of Joshibi University of Art and Design

\*\* Joshibi University of Art and Design

1900 Asamizodai, Minami-ku, Sagamihara, Kanagawa 252-0328, Japan

(Received 30 October 2013; Accepted 26 February 2014)

Grapheme-color synesthesia is a phenomenon in which letters and digits evoke perceptions of color. There is an ongoing debate on the levels of information processing and color perception required to induce a synesthetic experience. This study aims to identify the levels of sensory-perceptual processing at which synesthesia occurs by manipulating the visual forms and phonological pronunciation of Japanese Kana letters.

The results demonstrate that phonologic information (i.e. consonants and vowels) affects synesthetic color perception more than morphological forms. Our second finding is that synesthetic color perception that was elicited by different factors showed systematically characteristic distributions in the CIE  $L^*a^*b^*$  color space, based on E. Hering's opponent color theory. These results imply that grapheme-color synesthesia is more likely to be explained by the opponent-process color perception theory, than by categorical color perception associated with higher processing.

We conclude that grapheme-color synesthesia is a phenomenon that results from the multiple interactions between color processing and character processing that occurs at the stage of color opponency and pre-categorical color perception.

### 1. はじめに

色字共感覚は文字や数字に対して自動的に色の感覚が引き起こされる現象である。最近の研究では色字共感覚者は人口の1.4%を占めることが報告されている<sup>1)</sup>。

物理的な光に対する色字共感覚者の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な光と異なる色を知覚することができる。これらはfMRI, ERPなどの手法を用いた神経科学的研究<sup>2-4)</sup>、そして視覚探索課題におけるポップアウト効果やストループ干渉効果などを用いた心理物理的研究<sup>5-8)</sup>によって明確になっている。

色字共感覚のメカニズムは10年程前までは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<sup>9-11)</sup>。Dixonらは共感覚の経験の仕方により共感覚を分類し、身体の中で生じるのではなく外部の空間に知覚されるもの、すなわち印刷された文字に共感覚を経験するタイプを projector と呼び、文字から色が連想されるように共感覚を経験するタイプを associator と命名した<sup>11)</sup>。前者は低次レベルによる共感覚と、後者は高次レベルによる共感覚と類似した傾向を持つという報告がある<sup>12)</sup>。しかしながら近年の研究では色字共感覚は一つのレベルで誘発される現象ではなく、複数のレベルにおける複雑な現象であるという見解が出ている<sup>13,14)</sup>。

### 1.1 共感覚色を誘発する文字認識の処理過程

文字認識のうち形態情報は初期段階で処理されると考えられる<sup>15)</sup>が、色字共感覚はこの段階と色覚の処理過程との相互作用による現象であることが報告されている。例えば数字とアルファベットのように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O」、「数字1」と「英文字I」に対して同じカテゴリの共感覚色が生じたという報告があり<sup>16,17)</sup>、また同じ言語の中で幾何学的特徴(e.g., 直線, 曲線)が類似すると共感覚色も類似するという報告<sup>14,18)</sup>もある。さらに同じアルファベットでも英文字とキリル文字の間で似ている形態を持つ文字では、共感覚色の色相と飽和度において類似した傾向が見られた<sup>19)</sup>。これらは幾何学的特徴が共感覚色を生じさせることを示しており、文字認識の初期段階で生じていることを強く示唆している。

ただしBrangら<sup>18)</sup>は類似した形態により生じる共感覚色の類似性が projector タイプの共感覚者において強く現れる傾向があると報告し、associator タイプの共感覚者にはこの傾向が少ないことを示した。また形態情報が似ている文字を回転や変容(morphing)することにより他の文字として認識させた場合の共感覚色は、形態情報より被験者の文字認識に強く影響を受けた<sup>17)</sup>。さらに形態の幾何学的特徴は全く同じであるが完全な文字の形態は持たない二

# TAE CAT

図1 幾何学的特徴は同じであるが、文脈により異なる文字と認識される刺激。二つの文字による共感覚色は異なると報告されている<sup>9)</sup>。

つの文字(図1)の共感覚色も被験者の認識、すなわち文字刺激の前後にある文脈効果を受けて共感覚色が決定すると報告されている<sup>9)</sup>。

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音韻情報を付随し、音韻情報を処理する段階も色覚の処理過程と相互作用が行われていると指摘されている。同じ発音を持つ異なる言語の文字(英語とロシア語)に誘発される共感覚色を比較した場合、飽和度と明るさは異なったが、色相は同じ共感覚色が生じた<sup>19)</sup>。これは共感覚色が形態情報のみならず音韻情報によっても生じる現象であることを示唆する。この現象はおそらく新たな言語を学習する際に母国語の影響を受けるからであるだろうとWitthoft<sup>19)</sup>は述べている。

日本語の平仮名と片仮名は母音と子音が組み合わさってできているが、この共感覚色は二つの文字表記における形態情報が異なるにもかかわらず、同一の音韻情報をもつ文字どうしの共感覚色は類似しており、子音に強く依存していることが報告されている<sup>20)</sup>。またノルウェー語における各文字の共感覚色も母音より子音によって影響されることが示されている<sup>21)</sup>。一方、母音の高低と共感覚色の明るさや大きさの関係を検討した研究では、高い母音(e.g., /e/, /i/)に対して明るく小さな、低い母音(e.g., /u/, /o/)に対して暗く大きな視覚的共感覚が誘発されたと報告されている<sup>22,23)</sup>。これは共感覚色が子音と母音により異なる影響を受けることを示唆する。

### 1.2 文字により誘発された共感覚の色覚処理

色覚情報処理は一般的に網膜の視細胞が光の情報を受容することによって始まる。入力された情報は外側膝状体(LGN)を経て脳のV1、

V2, V3, そしてV4に伝えられ、さらに高次段階の側頭葉の fusiform 領域まで伝達されることが知られている<sup>24)</sup>。

神経生理学的研究では共感覚の色覚処理はこれらの段階のうち実際の色刺激において統合的な色処理を担当するV4<sup>3, 25-27)</sup> および fusiform gyrus<sup>28, 29)</sup>で行われることが指摘されている。またストループ効果を用いた心理物理的実験でも、共感覚の色知覚は反対色情報の処理を基にする初期段階、すなわちV1からV4/V8の間で生起される可能性が高いと報告されている<sup>30)</sup>。これらは共感覚色の処理過程が実際の色覚処理過程と大きな差異がないことを示唆するとともに、共感覚色を処理するためには必ず色覚処理過程を経る必要があることを示す。しかし幾つかの研究では共感覚の色処理がV4と fusiform 以外の処理過程によって処理されるという報告もある<sup>4, 31, 32)</sup>。

### 1.3 色知覚の処理過程及び各処理段階に対応する色空間

1.2節で記述した色覚処理過程では段階ごとに異なる色の表象が存在するため、これらの各段階に応じた色空間が提案されている。

最も初期段階では視細胞の感度に対応するLMS色空間 (MacLeod-Boynton 色空間) が有名であり<sup>33)</sup>、LGNなどの反対色反応ではDKL色空間が良く対応することが知られている<sup>34, 35)</sup>。

またHeringの現象的反対色に対する段階ではCIE  $L^*a^*b^*$  色空間があり<sup>36)</sup>、さらに高次段階では色カテゴリーに対応する色空間はないが、一般的にOSA色空間<sup>37-39)</sup>やCIE xy色度図<sup>40)</sup>を用いて研究がなされている。

1.1節と1.2節で示しているように色字共感覚の発生における処理段階の知見では、文字認識メカニズムと色覚メカニズムとで交互作用が行われていることが示唆されているが、これらの多くは神経科学的証拠に基づいている。しかし神経科学的な先行研究の結果は必ずしも一様ではなく、さらに情報処理メカニズムの心理物理的検討はほとんど知られていない。本研究では

共感覚色に影響することが知られている文字の形態情報と音韻情報を用い、これらの情報により共感覚色が色覚メカニズムのどの段階において誘発されるのかについて心理物理的実験を通じて検討することを目的とした。

## 2. 実験 1

### 2.1 目的

文字の形態情報が共感覚色を誘発することは知られているが、具体的に形態情報のどのような特徴が共感覚色を誘発するかについてはまだ明らかになっていない。そこで実験1では形態情報が類似する異なる文字を刺激として選び、これらにより誘発される共感覚色の分布を検討した。ここでは直線、曲線といった文字要素を幾何学的情報と呼び、回転や左右対称なども含めた情報を形態情報と呼ぶことにする。

### 2.2 実験方法

**被験者** 6~7才から色字共感覚を経験している色覚正常な20~28才の女性3名(IT, MT, AH)であり、彼女らは平仮名、片仮名及び漢字の3種類の日本語表記および数字、そして英語のアルファベットに対して共感覚色を経験していた。なお彼女らのインタビューを基に色字共感覚者のタイプ<sup>41)</sup>を分類した結果、ITとMTはprojector, AHはassociatorと言われる共感覚のタイプを有すると考えられた。

**実験装置** 実験は暗室内にある標準光源ブース (マクベスジャッジII) の色検査評価用D<sub>65</sub> 蛍光ランプの下で行われた。照度は1100 lxであった。観察角度は45°で、観察距離は約75 cmであった。

**刺激** 平仮名、片仮名、アルファベット、そして数字の中で形態情報が類似した以下の36文字を選び、それぞれ単独で呈示した。

- ① 幾何学的特徴が類似した文字どうし (0 (数字)-O (英文字), 1 (数字)-I (英文字), ん (ひらがな)-h (英文字))
- ② 幾何学的特徴が部分的に類似した文字どうし (る-ろ, め-ぬ, わ-れ, さ-き, ク-タ, フ-ラ)

- ③ 回転対称性をもつ文字どうし (へ-く, い-こ, エ (片仮名)-H (英文字), N-Z, d-p, b-q)
- ④ 左右対称性をもつ文字どうし (さ-ち, b-d, p-q)

刺激は視野角  $13.15^\circ \times 9.2^\circ$  (10 cm  $\times$  7 cm) の白い背景の上に印刷された  $4.6^\circ \times 6.5^\circ$  (3.5 cm  $\times$  5 cm) の黒いゴシックの文字であった。なおこれらの刺激作成にあたり、回転、左右対称などの空間的変換には幾何学的に全く同一の原図を用いた。

**手順** 刺激に関する説明は被験者にせず、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。また呈示した刺激の音読みを行うことで、類似した形態の文字認識を確認した。被験者が刺激と共感覚色とのマッチングを終えるまでは、次の試行を移らなかつた。実験は3回繰り返す、各実験間には約1ヵ月の間隔をあげた。

## 2.3 結果

共感覚色の分析には CIE  $L^*a^*b^*$  均等色空間を使用し、その類似性は  $a^*b^*$  色座標上のユークリッド距離 ( $ab$  クロマ  $C_{ab}^*$ ) を基に、また共感覚色の分布は色相角を基に判断した。CIE  $L^*a^*b^*$  色空間では三つの軸があり、 $L^*$  軸は明度、 $a^*$  軸は赤方向と緑方向、 $b^*$  軸は黄方向と青方向を表す。 $a^*b^*$  色座標は原点から遠ざかるほど彩度が高くなる。

全共感覚色における  $L^*$  値は比較的狭い範囲に分布した ( $M=60.06, SD=23.47$ ) ため、実験1では  $L^*$  値を分析から除外して  $a^*b^*$  値のみを用いた。また各被験者間では同じ刺激に対して必ずしも同じ共感覚色を報告しなかつたが、各個体内の変動は小さかつたため3回の繰り返しのデータを平均して  $a^*b^*$  平面上にプロットした。共感覚色はマンセル色票から選択されたため、実験の観察条件を考慮して  $L^*a^*b^*$  値へ変換した。

### 2.3.1 共感覚色の類似性

形態情報の類似性による共感覚色への影響を

検討するため、条件①から条件④の各条件の結果を図2~5に示した。

各条件において形態情報が類似した文字刺激による共感覚色間の距離とそれ以外の文字刺激による共感覚色間の距離を求め、条件間における一元配置の分散分析を行った。その結果いずれの条件においても有意差は見られなかつた (条件①:  $[F(1, 52)=3.15, n.s.]$ , 条件②:  $[F(1, 52)=0.78, n.s.]$ , 条件③:  $[F(1, 52)=0.04, n.s.]$ , 条件④:  $[F(1, 52)=0.47, n.s.]$ )。また被験者毎に一元配置の分散分析を行ったが、やはり有意な傾向は見られなかつた (AH:  $[F(1, 52)=0.28, n.s.]$ , IT:  $[F(1, 52)=0.76, n.s.]$ , MT:  $[F(1, 52)=2.03, n.s.]$ )。

### 2.3.2 共感覚色の分布

類似した形態情報による共感覚色を結んだ直線の傾きは、幾何学的情報の空間的変換により異なる傾向が見られた。条件③と条件④に対する分布の場合、前者は黄緑方向と紫方向を結ぶ負の傾きに分布する傾向があり (図4)、後者はオレンジ方向と青緑方向を結ぶ正の傾きに分布する傾向が見られた (図5)。一方比較する文字刺激の形態情報が同じであった条件①の共感覚色は黄と青を結ぶ方向のみに分布する傾向が見られた (図2)。

このような各条件における色相分布の傾きを定量化して検討するために、メトリック色相角  $h_{ab}$  を用いた。色相角は2点のうち原点に近い方の座標を基準として求めた。条件①から④の色相角  $h_{ab}$  の分布を図6~9に示した。比較する二文字の共感覚色が90度の色相角になるということは  $b^*$  軸方向のみ分布することを示す。

条件①の共感覚色では無彩色があつたため (IT: ん (平仮名), MT: 0 (数字), O (英文字)), 色相角の分析から排除した。

幾何学的情報が一致する条件①の最頻値は幾何学的情報が部分的に類似した条件②の最頻値と同じ  $80 \leq h_{ab} < 100$  であつたが、条件①に対する共感覚色の色相角はほぼ  $60 \leq h_{ab} < 120$  であつた (図6) ことに比べ、条件②に対する共

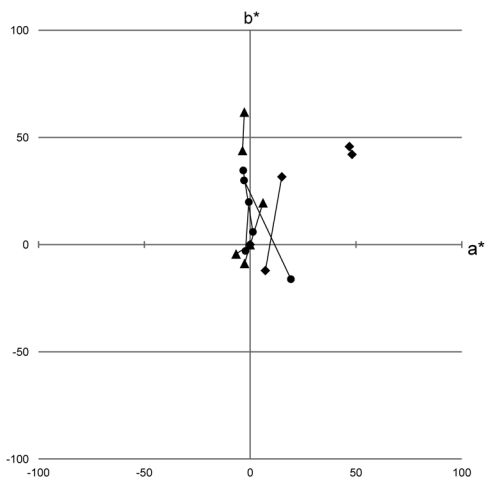


図2 幾何学的特徴が類似した文字どうし(条件①)の共感覚色を示した全員の分布. 比較する刺激対は直線で結んである(AH:●, IT:▲, MT:◆).  $a^*$ 軸は赤と緑を表し,  $b^*$ 軸は黄と青を表す.

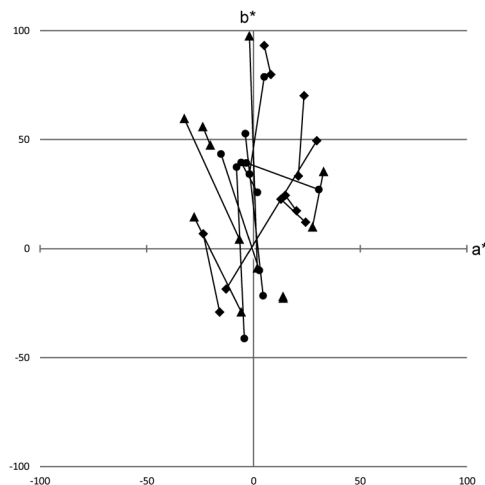


図4 回転対称性を持つ文字どうし(条件③)の共感覚色を示した全員の分布. 比較する刺激対は直線で結んである(AH:●, IT:▲, MT:◆).  $a^*$ 軸は赤と緑を表し,  $b^*$ 軸は黄と青を表す.

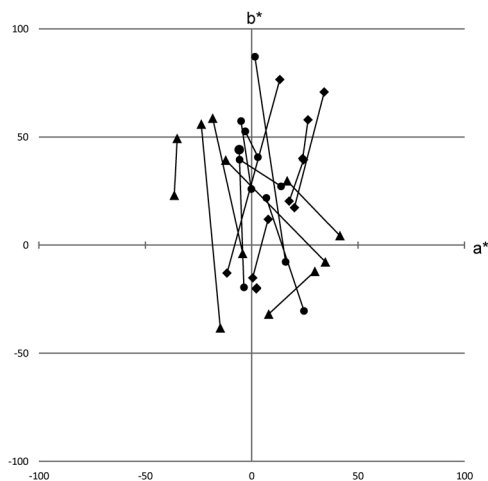


図3 幾何学的特徴が部分的に類似した文字どうし(条件②)の共感覚色を示した全員の分布. 比較する刺激対は直線で結んである(AH:●, IT:▲, MT:◆).  $a^*$ 軸は赤と緑を表し,  $b^*$ 軸は黄と青を表す.

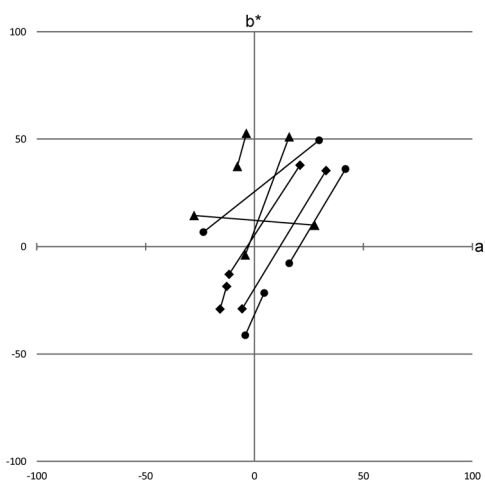


図5 左右対称性を持つ文字どうし(条件④)の共感覚色を示した全員の分布. 比較する刺激対は直線で結んである(AH:●, IT:▲, MT:◆).  $a^*$ 軸は赤と緑を表し,  $b^*$ 軸は黄と青を表す.

感覚色の色相角は  $40 \leq h_{ab} < 160$  に幅広く分布していた(図7).

一方条件③における共感覚色の色相角は  $80 \leq h_{ab} < 140$  で, 最頻値は  $100 \leq h_{ab} < 120$  であるのに対し(図8), 条件④における共感覚色の色相角は  $20 \leq h_{ab} < 80$  の間に分布して最頻値は  $60 \leq h_{ab} < 80$  であった(図9).

空間的変換の特徴による共感覚色の変動を検討するため, 一つの条件における色相角とそれ以外の色相角とでそれぞれ一元配置の分散分析を行った. その結果条件④の色相角とそれ以外の色相角のみ有意な差が認められた [ $F(1, 50) = 7.16, p = .010$ ].

形態情報による共感覚色が色カテゴリーによ

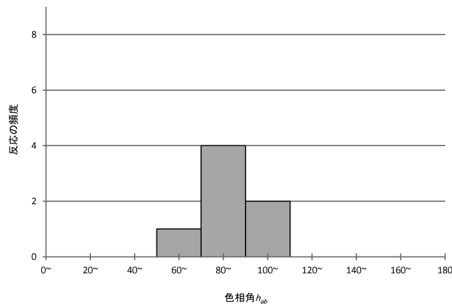


図6 幾何学的特徴が類似した文字(条件①)の共感覚色における全員の色相角 $h_{ab}$ の度数分布(20度間隔).

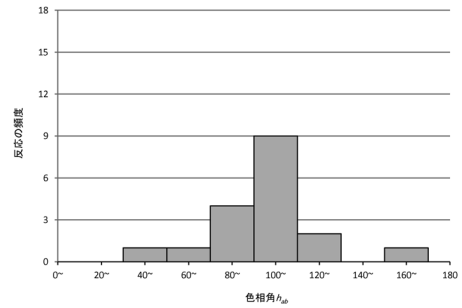


図8 回転対称性を持つ文字(条件③)の共感覚色における全員の色相角 $h_{ab}$ の度数分布(20度間隔).

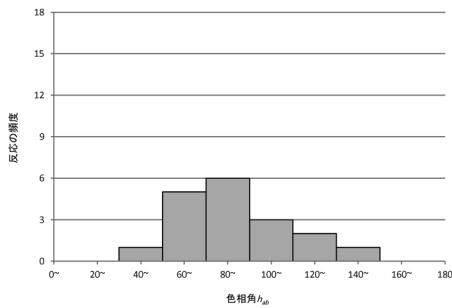


図7 幾何学的特徴が部分的に類似した文字(条件②)の共感覚色における全員の色相角 $h_{ab}$ の度数分布(20度間隔).

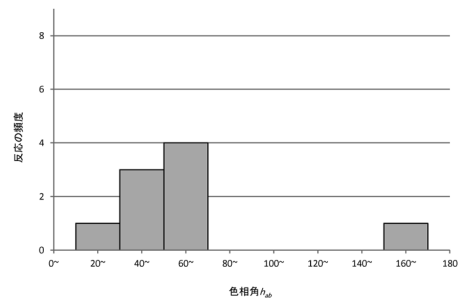


図9 左右対称性を持つ文字(条件④)の共感覚色における全員の色相角 $h_{ab}$ の度数分布(20度間隔).

り特徴的分布を示すかを確認するため、図2～5に示した共感覚色をJIS基本色名で区分したCIE xy色度図にプロットした。その結果形態情報による共感覚色はどの被験者においても必ずしも色カテゴリーごとに集まる傾向が見られなかった。例としてAHにおける回転対称性を持つ文字(条件③)の共感覚色を図10に示した。

## 2.5 考察

形態情報が同一または類似であるにもかかわらず他の文字としての認識が生じると、多くの場合異なる共感覚色が生じた。これは共感覚色が形態以外の要因による文字認識によって強い影響を受けたという報告<sup>17)</sup>と一致する。

しかしながら各条件における共感覚色は反対色の見えを基準とするCIEL\*a\*b\*空間内で体系的な動きを示すことがわかった。共感覚の色知覚メカニズムが反対色性を示すという結果は、物理的の色と共感覚色の干渉効果であるスト

ループ課題を用いた研究でも報告されており、刺激と共感覚色が反対色の場合(i.e. red vs. green)の方が、そうでない場合(e.g., red vs. blue)よりも反応時間が短かった<sup>30)</sup>。このような現象は共感覚色が一般の色知覚メカニズムと同様の処理を経た結果であることを示す。

共感覚色の分布は条件①から④の各条件によって異なった。このうち条件①と②における共感覚色は他の条件と比べて「黄-青」反対色軸に沿った分布を多く示した。これは幾何学的情報が類似した文字どうしては「赤-緑」反対色軸に沿っての変動が見られなかったことを意味する。一方幾何学的情報がほぼ同一であるにもかかわらず空間的変換を行った条件③と④の共感覚色では、「黄-青」反対色軸と「赤-緑」反対色軸の両方が同時に、なおかつ同一の方向に変化した。a\*b\*の両軸において同方向の変動が現れたことは、幾何学的情報の処理が「赤-緑」反対色の処理過程に、方向や対称性

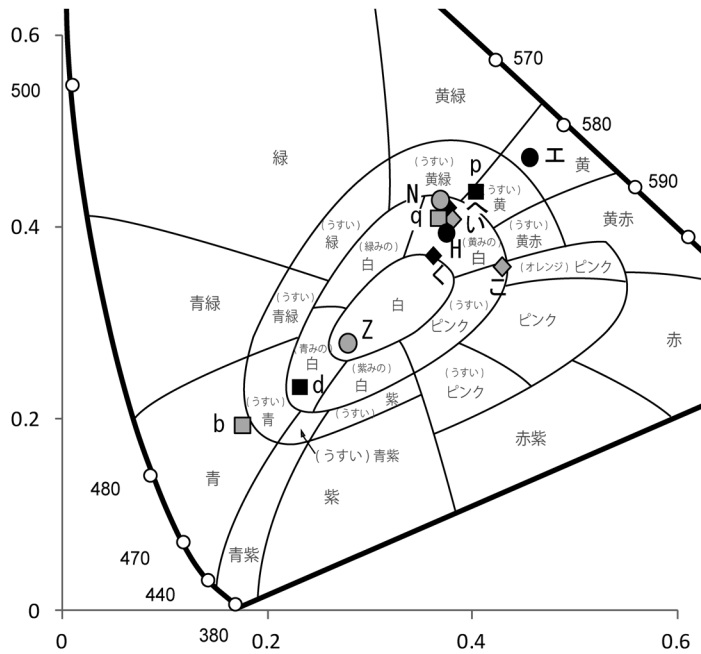


図10 JIS基本色名ごとに区分したCIE xy色度図上にプロットした回転対称性を持つ文字(条件③)の共感覚色(AH) (◆:へ-く, ◆:い-こ, ●:エ(片仮名)-H(英文字), ●:N-Z, ■:d-p, ■:b-q).

などの幾何学以外の情報処理が「赤-緑」, 「黄-青」方向の反対色の処理過程に関係していることを示唆する。

「赤-緑」の反対色知覚と「黄-青」の反対色知覚は独立した処理メカニズムを経ていると報告されている<sup>34,42</sup>。これは色知覚の弁別力において現れ,例えばADHDやParkinsonのような特定の疾病を持っている人々は「黄-青」反対色の色弁別のみが一般人に比べて顕著に劣るとする報告がある<sup>43,44</sup>。「赤-緑」の反対色知覚はparvocellular経路を,「黄-青」の反対色知覚はkoniocellular経路を経由することが知られており<sup>45-47</sup>, parvocellularを経由した情報は色相のみならず形態の処理にも関与すると報告されている<sup>48,49</sup>。このことは本実験で得られた幾何学的情報による共感覚色は「赤-緑」反対色の情報と同一の経路により処理されると考えられることと一致する。

一方,網膜から皮質に至る階層的処理の各段階における反対色軸は,現象的反対色と異なることが報告されている。LGNの反対色軸(cardinal axes)はマゼンタとシアンおよび黄緑

と紫によると考えられる<sup>50</sup>二つの基本軸であり, Hering<sup>51</sup>やHurvich and Jameson<sup>52</sup>により提唱された現象的反対色と10度から50度ずれていることが報告されている<sup>53</sup>。以上のことから形態情報により生じた共感覚の色知覚はLGNでの色情報処理より高次の反対色情報の処理段階によって処理されると考えられる。

ここで形態情報による共感覚色が現象的反対色の処理段階より高次のカテゴリーカル色知覚によって処理されるのであれば,類似した形態情報による共感覚色は同じ色カテゴリーに分類されなければならない。しかし本実験の結果では比較する共感覚色が色カテゴリーごとに分類される場合はほとんど見られなかったことから,共感覚の色知覚はカテゴリーカル色知覚の処理段階に依存していないと考えられる。

このように文字の形態情報により誘発される色字共感覚色は形態情報の処理段階と,反対色を処理する段階からカテゴリーカル色知覚の処理段階以前までの間で行われる交互作用によって生じると考えられる。

## 3. 実験 2

共感覚色は形態情報のみならず、より高次で処理されると考えられる音韻情報による影響も受けることが知られている。そこで実験2では音韻情報を用いて共感覚色の処理過程を検討した。

### 3.1 目的

共感覚色における色相は子音の影響を受け<sup>20,21)</sup>、明るさは母音の影響を受けることが知られている<sup>22,23)</sup>。日本語は母音と子音を組み合わせた文字であるため、共感覚色の色相と明るさを同時に検討する際に適した言語であると考えられる。

本実験では子音と母音により引き起こされる共感覚の色知覚がどのような色空間軸に基づいて分布するのかを検討することを目的とする。

### 3.2 実験方法

**被験者** 実験1と同じ被験者3名。

**実験装置** 実験1と同じ装置を用いた。

**刺激** 以下に示す平仮名29文字であり、それぞれ単独に呈示した。他の刺激条件は実験1と同様であった。

- ① あ・い・う・え・お
- ② か・き・く・け・こ
- ③ さ・し・す・そ
- ④ た・ち・つ・て・と
- ⑤ な・に・ぬ・ね・の
- ⑥ ら・り・る・れ・ろ

**手順** 実験1と同様の手順で行った。

### 3.3 結果

同一の子音どうしと同一の母音どうしに対する3回繰り返した結果の平均値をCIE  $L^*a^*b^*$  色空間にプロットして反応間の距離を求めた。

$L^*$ 値は母音と子音により誘発された共感覚色間に有意差が見られなかった(母音:  $[F(4, 10)=1.14, n.s.]$ , 子音:  $[F(5, 12)=2.25, n.s.]$ )ため、共感覚色は実験1と同様に $a^*b^*$ 色座標上のユークリッド距離を基に判断した。

各刺激による反応を色空間にプロットした結果、同一の母音によるグループと同一の子音に

よるグループの二種が存在することがわかった。

母音により誘発されたと考えられる共感覚色の群は図11~13で破線に表示し、子音により誘発されたと考えられる共感覚色の群は実線に表示した。

同じ子音により誘発される共感覚色を検討するため、同一の子音による共感覚色間の距離とそれ以外の子音による共感覚色の距離を求め一元配置の分散分析を行った。なおこの際同じ子音による共感覚色のうち明らかに母音の影響を受けたと考えられる共感覚色は同一子音における分散分析から除外した(e.g., ITの「こ」, MTの「れ」)。これは各行最高で一文字であった。その結果同一の子音により誘発される全員の共感覚色はその他の子音による共感覚色より集まっていた(AH:  $[F(1, 188)=10.61, p=.0013]$ , IT:  $[F(1, 169)=48.78, p<.001]$ , MT:  $[F(1, 251)=19.84, p<.001]$ )。

一方同じ母音により引き起こされた共感覚色も子音の分析と同様に同一の母音による共感覚色の距離とそれ以外の母音による共感覚色の距離を求め一元配置の分散分析を行った。この際同じ母音による共感覚色のうち明らかに子音の影響を受けたと考えられる共感覚色は同一母音における分散分析から除外した(e.g., AHの「し」, MTの「さ」)。これは各段最高で一文字であった。その結果同一の母音による全員の共感覚色は異なる母音による共感覚色より集まっていた(AH:  $[F(1, 188)=7.937, p=.0053]$ , IT:  $[F(1, 274)=9.55, p=.0022]$ , MT:  $[F(1, 251)=19.84, p<.001]$ )。

なお各要素により誘発された共感覚色は色空間の中で特徴的な分布を示した。例えば同一の子音による共感覚色の場合、AHの「な行」と「た行」、そして「さ行」は $a^*$ 軸に沿った分布が多く(図11の実線)、ITの「か行」と「な行」も同様であった(図12の実線)。これに比べて同一の母音による共感覚色は同一の子音による共感覚色ほど明確な傾向が見られなかったが、そのうち「い段」は $b^*$ 軸に沿った分布が多く、



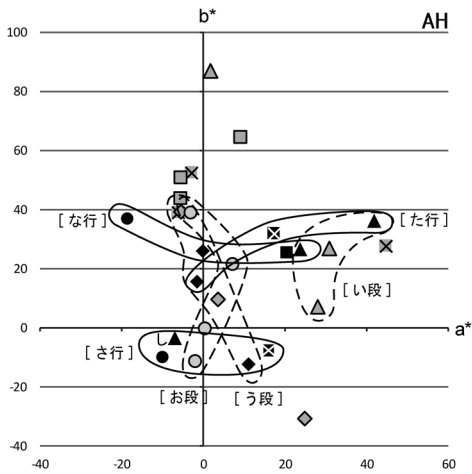


図11 各要素により誘発された共感覚色。実線は子音による群であり、破線は母音による群である(×: あ段, ▲: い段, ◆: う段, ■: え段, ○: お段)。

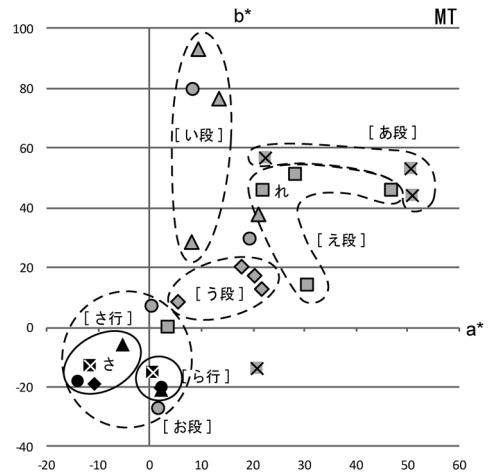


図13 各要素により誘発された共感覚色。実線は子音による群であり、破線は母音による群である(×: あ段, ▲: い段, ◆: う段, ■: え段, ○: お段)。

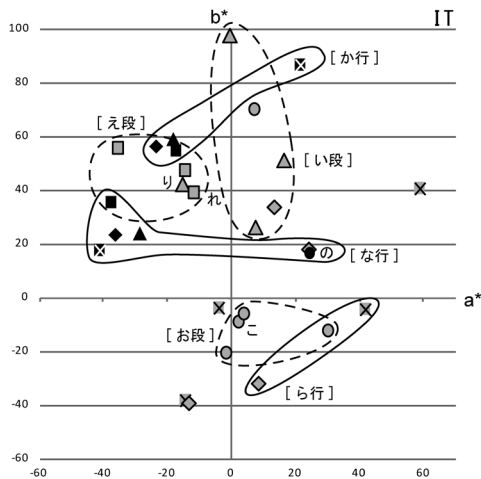


図12 各要素により誘発された共感覚色。実線は子音による群であり、破線は母音による群である(×: あ段, ▲: い段, ◆: う段, ■: え段, ○: お段)。

「お段」は原点の周辺に分布している傾向が見られた。

これらの分布が色カテゴリーにより分類するかを確認するため図11~13に示された共感覚色をJIS基本色名に区分したCIE xy色度図にプロットした。その結果同一母音および同一子音による共感覚色はどの被験者でも必ずしも同じ色カテゴリーに属するわけではなかった。例として同一子音によるITの共感覚色を図14に示

した。

### 3.4 考察

同一の子音を持つ文字は異なる子音を持つ文字より類似した共感覚色を誘発することがわかった。これは文字の子音が共感覚色の類似性に強く影響を及ぼすといった報告<sup>20,21)</sup>と一致する。

なお子音により誘発された共感覚色はCIE  $L^*a^*b^*$ 色空間内で「赤-緑」軸に沿っては広く分布したのに対し、「黄-青」軸に沿って分布した範囲が狭かった。これは同じ子音による共感覚色が「黄-青」の反対色軸に対してほとんど変化していないことを意味する。

一方母音は共感覚色の明るさに影響を及ぼすことが知られているが、子音と母音の組み合わせで構成される日本語の仮名の場合、同一の母音を持つ文字は類似した共感覚色を誘発するだけで明るさに対する差異はほとんどないことがわかった。これは母音が共感覚色の明るさより共感覚色の色みに強い影響を及ぼしていることを示す。

なおかつ色空間内で母音によって誘発される共感覚色の分布は子音によって誘発された共感覚色の分布ほど明瞭でなかったが、特定の段に対して特徴的分布を示した。例えば「い段」の

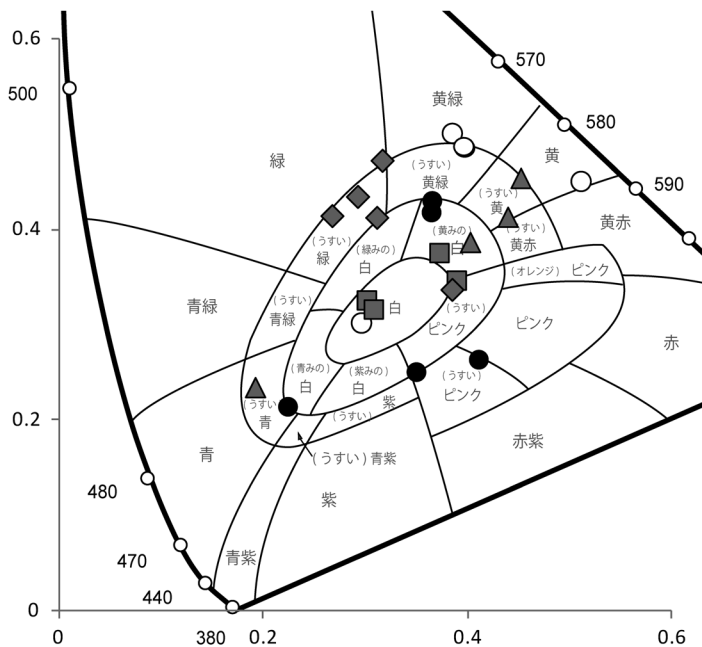


図 14 CIE xy 色度図における同一子音による共感覚色 (IT) (○：か行, ■：さ行, ▲：た行, ◆：な行, ●：ら行).

共感覚色は「赤-緑」反対色軸に沿った分布より「黄-青」反対色軸に沿った分布が多く、「お段」における共感覚色は無彩色が多かった。

以上のように音韻情報の類似性により分類された色字共感覚色は CIE  $L^*a^*b^*$  色空間内で特徴的な分布を示し、さらに母音と子音により誘発された共感覚色の各分布は異なる傾向を示していた。これは刺激の違いによる共感覚色の違いが現象的反対色において最も単純に表れることを意味し、現象的反対色のレベルで生じる感覚であることを強く示唆する。

二つの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<sup>54)</sup>、「黄-青」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<sup>46,55)</sup>とされている。文字の音韻情報処理は dorsal 経路によっても処理されることが知られていることから<sup>56,57)</sup>、子音により誘発された共感覚色は「黄-青」反対色の見えを処理する過程に関係している可能性が考えられる。

一方同一母音および同一子音による共感覚色は必ずしも同じ色カテゴリー範囲に集まるわけではなかったことから、音韻情報による色字共感覚色は色カテゴリーの処理に至る前に文字の音韻情報処理段階と交互作用を行うことで生じると考えられる。

#### 4. 結 論

本研究では色字共感覚色の類似性を引き起こすことが知られている形態情報と音韻情報を手がかりとして、色字共感覚のメカニズムを検討した。

共感覚色は似ている形態情報により必ずしも類似していなかったが、被験者や刺激によっては類似した共感覚色が生じた。また音韻情報によっても影響を受け、子音のみならず母音も強い影響を持つことがわかった。これらは共感覚色が単一の情報によって誘発される現象ではなく、文字認識の多段階において誘発される現象であることを示唆する。

一方共感覚色は形態情報と音韻情報のいずれにおいても CIE  $L^*a^*b^*$  色空間の二軸に沿った

特徴的な分布を示した。これは共感覚の色知覚が二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。RGB色空間を用いた研究では均等に感覚量を検討できるCIE  $L^*a^*b^*$ 色空間の方が共感覚色の解明において適切であると報告されている<sup>58)</sup>。

このように色字共感覚は現象的反対色による色知覚であると考えられ、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と考えられる。

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。

共感覚の色知覚が三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)は現象的反対色軸と一致しないことが知られている<sup>34, 35, 50, 53, 59, 60)</sup>。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LGNの反対色軸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細胞はLGNの細胞より狭い波長範囲の色に特化して応答<sup>61)</sup>、反対色性の情報は維持される<sup>62)</sup>。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<sup>61, 63, 64)</sup>。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<sup>65)</sup>では赤、緑、黄、青の4色における色の分類(color categorization)が可能であったことが報告されており、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が考えられる。

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交互作用が生じていると考えられる。

一方本研究で得られた結果では形態情報や音

韻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の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<sup>66-68)</sup>。

V4は同じ波長のみ反応する特徴があること<sup>56)</sup>から連続の色知覚が処理されると考えられ、IT細胞は色相と彩度の狭い範囲に反応する特徴的な色選択性を持ち<sup>69)</sup>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<sup>70)</sup>。さらにカテゴリカル色知覚を含んだカテゴリー判断はITのみならず、より高次の下側頭皮質前部(aIT)や前頭前野(PF)によっても処理される<sup>71, 72)</sup>。このことは共感覚の色知覚がIT段階まで至らず、V4の処理段階で文字情報の処理過程と交互作用していることを示唆する。

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<sup>25-27)</sup>。さらに共感覚色の応答はV4やV8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左舌状回(Left medial Lingual gyrus)<sup>32)</sup>も関与することが報告されている。本研究の結果から得られた考察はこれらの報告と一致する。

以上のことから色字共感覚は文字認識の処理過程と色知覚のうちV1、V2、V3、V4、V8など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、現象的反対色を処理する大脳の低次段階からカテゴリカル色知覚を処理する段階以前の間で文字認識の処理段階と交互作用を生じることにより誘発される現象であると考えられる。

色字共感覚の研究では被験者および文字刺激の数に制限があり、さらに同じ文字刺激に対し被験者ごとに異なる共感覚色を経験することも

少なくない。このような個人差やデータの数は共感覚の研究において根源的に生じる問題であるが、共通のメカニズムを解明することが重要であると考えられる。

## 文 献

- 1) J. Simner, N. Sagiv, C. Mulvenna, E. Tsakanikos, S. A. Witherby, C. Fraser, K. Scott and J. Ward: Synaesthesia: The prevalence of atypical cross-modal experiences. *Perception*, **35**, 1024–1033, 2006.
- 2) E. Paulesu, J. Harrison, S. Baron-Cohen, J. D. G. Watson, L. Goldstein, J. Heather, R. S. J. Frackowiak and C. D. Frith: The physiology of coloured hearing A PET activation study of colour-word synaesthesia. *Brain*, **118**, 661–676, 1995.
- 3) J. A. Nunn, L. J. Gregory, M. Brammer, S. C. Williams, D. M. Parslow, M. J. Morgan, R. G. Morris, E. T. Bullmore, S. Baron-Cohen and J. A. Gray: Functional magnetic resonance imaging of synesthesia: Activation of V4/V8 by spoken words. *Nature Neuroscience*, **5**, 371–375, 2002.
- 4) T. M. Van Leeuwen, K. M. Petersson and P. Hagoort: Synaesthetic colour in the brain: Beyond colour areas. A functional magnetic resonance imaging study of synaesthetes and matched controls. *PloS ONE*, **5**, e12074, 2010.
- 5) E. M. Hubbard, S. Manohar and V. S. Ramachandran: Contrast affects the strength of synesthetic colors. *Cortex*, **42**, 184–194, 2006.
- 6) J. Ward, C. Jonas, Z. Dienes and A. Seth: Grapheme-colour synaesthesia improves detection of embedded shapes, but without pre-attentive ‘pop-out’ of synaesthetic colour. *Proceedings of the Royal Society B*, **277**, 1021–1026, 2009.
- 7) D. Smilek, M. J. Dixon, C. Cudahy and P. M. Merikle: Synesthetic Color Experiences Influence Memory. *Psychological Science*, **13**, 548–552, 2002.
- 8) J. Ward and J. Simner: Lexical-gustatory synaesthesia: Linguistic and conceptual factors. *Cognition*, **89**, 237–261, 2003.
- 9) V. S. Ramachandran and E. M. Hubbard: Synaesthesia: A window into perception, thought and language. *Journal of Consciousness Studies*, **8**, 3–34, 2001.
- 10) G. Martino and L. E. Marks: Synesthesia: Strong and weak. *Current Directions in Psychological Science*, **10**, 61–65, 2001.
- 11) M. J. Dixon, D. Smilek and P. M. Merikle: Not all synaesthetes are created equal: Projector versus associator synaesthetes. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, **4**, 335–343, 2004.
- 12) J. Ward and J. B. Mattingley: Synaesthesia: An overview of contemporary findings and controversies. *Cortex*, **42**, 129–136, 2006.
- 13) D. Smilek, J. S. Carriere, M. J. Dixon and P. M. Merikle: Grapheme frequency and color luminance in grapheme-color synaesthesia. *Psychological Science*, **18**, 793–795, 2007.
- 14) M. R. Watson, K. A. Akins and J. T. Enns: Second-order mappings in grapheme-color synaesthesia. *Psychonomic Bulletin & Review*, **19**, 211–217, 2012.
- 15) 恵羅修吉：多義的な単語の処理と文脈効果：同綴異義語を用いて。教育学部紀要第**52**，29–50，1989。
- 16) R. E. Cytowic and D. M. Eagleman: *Wednesday is indigo blue: Discovering the brain of synesthesia*. MIT Press, Cambridge, MA, 24–36, 2009.
- 17) B. Bridgeman, D. Wintero and P. Tseng: Dynamic phenomenology of grapheme-color synesthesia. *Perception*, **39**, 671–676, 2010.
- 18) D. Brang, R. Rouw, V. S. Ramachandran and S. Coulson: Similarly shaped letters evoke similar colors in grapheme-color synesthesia. *Neuropsychologia*, **49**, 1355–1358, 2011.
- 19) N. Witthoft and J. Winawer: Synesthetic colors determined by having colored refrigerator magnets in childhood. *Cortex*, **24**, 175–183, 2006.

- 20) M. Asano and K. Yokosawa: Synesthetic colors are elicited by sound quality in Japanese synesthetes. *Consciousness and Cognition*, **20**, 1816–1823, 2011.
- 21) F. Svartdal and T. Iversen: Consistency in synesthetic experience to vowels and consonants: Five case studies. *Scandinavian Journal of Psychology*, **30**, 220–227, 1989.
- 22) L. E. Marks: On colored-hearing synaesthesia: Cross-modal translations of sensory dimensions. *Psychological Bulletin*, **82**, 303–331, 1975.
- 23) L. E. Marks: *The unity of the senses: Interrelations among the modalities*. New York: Academic Press, 257–275, 1978.
- 24) R. Snowden, P. Thompson and T. Troscianko: *Basic vision: An introduction to visual perception (2nd Ed.)*. Oxford University Press, 2012.
- 25) D. Brang, E. M. Hubbard, S. Coulson, M. Huang and V. S. Ramachandran: Magnetoencephalography reveals early activation of V4 in grapheme-color synesthesia. *NeuroImage*, **53**, 268–274, 2010.
- 26) E. M. Hubbard, A. C. Arman, V. S. Ramachandran and G. M. Boynton: Individual differences among grapheme-color synesthetes: Brain-behavior correlations. *Neuron*, **45**, 975–985, 2005.
- 27) J. M. Sperling, D. Prvulovic, D. E. J. Linden, W. Singer and A. Stirn: Neuronal correlates of colour-graphemic synaesthesia: A fMRI Study. *Cortex*, **42**: 295–303, 2006.
- 28) R. Rouw and H. S. Scholte: Increased structural connectivity in grapheme-color synesthesia. *Nature Neuroscience*, **10**, 792–797, 2007.
- 29) P. H. Weiss and G. R. Fink: Grapheme-colour synaesthetes show increased grey matter volumes of parietal and fusiform cortex. *Brain*, **132**, 65–70, 2009.
- 30) D. Nikolic, P. Lichti and W. Singer: Color opponency in synaesthetic experiences. *Psychological Science*, **18**, 481–486, 2007.
- 31) J. M. Hupé, C. Bordier and M. Dojat: The neural bases of grapheme-color synesthesia are not localized in real color-sensitive areas. *Oxford Journals*, **22**, 1622–1633, 2012.
- 32) A. N. Rich, M. A. Williams, A. Puce, A. Syngienotis, M. A. Howardg, F. McGloneg and J. B. Mattingley: Neural correlates of imagined and synaesthetic colours. *Neuropsychologia*, **44**, 2918–2925, 2006.
- 33) D. I. A. MacLeod and R. M. Boynton: Chromaticity diagram showing cone excitation by stimuli of equal luminance. *Journal of the Optical Society of America*, **69**, 1183–1186, 1979.
- 34) J. Krauskopf, D. R. Williams and D. W. Heeley: Cardinal directions of color space. *Vision Research*, **22**, 1123–1131, 1982.
- 35) A. M. Derrington, J. Krauskopf and P. Lennie: Chromatic mechanisms in lateral geniculate nucleus of macaque. *The Journal of Physiology*, **357**, 241–265, 1984.
- 36) X. Zhang and B. A. Wandell: A spatial extension of CIELAB for digital color: Image reproduction. *Journal of the Society for Information Display*, **5**, 61–63, 1997.
- 37) R. M. Boynton and C. X. Olson: Locating basic colors in the OSA space. *Color Research & Application*, **12**, 94–105, 1987.
- 38) 鯉田孝和, 内川恵二: 色空間の分類数に応じて現れる階層的なカテゴリカル色知覚. 照明学会誌, **84**, 302–311, 2000.
- 39) K. Yokoi and K. Uchikawa: Color category influences heterogeneous visual search for color. *Journal of the Optical Society of America*, **22**, 2309–2317, 2005.
- 40) 片山一郎: 色覚特性がカテゴリカル色知覚に与える影響. *Memoirs of the Faculty of Biology-Oriented Science and Technology of Kinki University*, **26**, 79–85, 2010.
- 41) R. Skelton, C. Ludwig and C. Mohr: A novel, illustrated questionnaire to distinguish projector and associator synaesthetes. *Cortex*, **45**, 721–729, 2009.
- 42) S. Chatterjee and E. M. Callaway: Parallel

- colour-opponent pathways to primary visual cortex. *Nature*, **426**, 668–671, 2003.
- 43) T. Banaschewski, S. Ruppert, R. Tannock, B. Albrecht, A. Becker, H. Uebel, J. Sergeant and A. Rothenberger: Colour perception in ADHD. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, **47**, 568–572, 2006.
  - 44) R. Tannock, T. Banaschewski and D. Gold: Color naming deficits and attention-deficit/hyperactivity disorder: A retinal dopaminergic hypothesis. *Behavioral and Brain Functions*, **2**, doi:10.1186/1744-9081-2-4, 2006.
  - 45) P. R. Martin, A. J. R. White, A. K. Goodchild, H. D. Wilder and A. E. Sefton: Evidence that blue-on cells are part of the third geniculocortical pathway in primates. *European Journal of Neuroscience*, **9**, 1536–1541, 1997.
  - 46) S. H. C. Hendry and R. C. Reid: The koniocellular pathway in primate vision. *Annual Review of Neuroscience*, **23**, 127–153, 2000.
  - 47) L. C. Sincich and J. C. Horton: The Circuitry of V1 and V2: Integration of Color, Form, and Motion. *Annual Review of Neuroscience*, **28**, 303–326, 2005.
  - 48) M. S. Livingstone and D. H. Hubel: Segregation of form, color, movement, and depth: Anatomy, physiology, and perception. *Science*, **240**, 740–749, 1988.
  - 49) D. C. Van Essen and J. L. Gallant: Neural mechanisms of form and motion processing in the primate visual system. *Neuron*, **13**, 1–10, 1994.
  - 50) P. Flanagan, P. Cavanagh and O. E. Favreau: Independent orientation-selective mechanisms for the cardinal directions of colour space. *Vision Research*, **30**, 769–778, 1990.
  - 51) E. Hering: *Outlines of a theory of the light Sense*. Cambridge, Massachusetts. Harvard University Press, 1876.
  - 52) L. M. Hurvich and D. Jameson: An opponent-process theory of color vision. *Psychological Review*, **64**, 384–404, 1957.
  - 53) R. L. De Valois, K. K. De Valois and L. E. Mahon: Contribution of S opponent cells to color appearance. *Proceedings of the National Academy of Science*, **97**, 512–517, 2000.
  - 54) W. H. Merigan and J. H. R. Maunsell: How parallel are the primate visual pathways? *Annual Review of Neuroscience*, **16**, 369–402, 1993.
  - 55) V. A. Casagrande: A third parallel visual pathway to primate area V1. *Trends in Neurosciences*, **17**, 305–310, 1994.
  - 56) G. Hickok and D. Poeppel: Dorsal and ventral streams: A framework for understanding aspects of the functional anatomy of language. *Cognition*, **92**, 67–99, 2004.
  - 57) K. Kinsey, P. C. Hansen and C. H. Chase: Dorsal stream associations with orthographic and phonological processing. *Neuroreport*, **17**, 335–339, 2006.
  - 58) P. D. Thornley Head: Synaesthesia: Pitch-color isomorphism in RGB-space? *Cortex*, **42**, 164–174, 2006.
  - 59) S. M. Wuerger, P. Atkinson and S. Cropper: The cone input to the unique-hue mechanisms. *Vision Research*, **45**, 3210–3223, 2005.
  - 60) M. A. Webster, E. Miyahara, G. Malkoc and V. E. Raker: Variations in normal color vision. II. Unique hues. *Journal of the Optical Society of America*, **17**, 1545–1555, 2000.
  - 61) R. L. DeValois, N. P. Cottaris, S. D. Elfar, L. E. Mahon and J. A. Wilson: Some transformations of color information from lateral geniculate nucleus to striate cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **97**, 4997–5002, 2000.
  - 62) K. T. Mullen, S. D. Dumoulin, K. L. McMahan, G. I. de Zubicaray and R. F. Hess: Selectivity of human retinotopic visual cortex to S-cone-opponent, L/M-cone-opponent and achromatic stimulation. *European Journal of Neuroscience*, **25**, 491–502, 2007.

- 63) P. Lennie, J. Krauskopf and G. Sclar: Chromatic mechanisms in striate cortex of macaque. *The Journal of Neuroscience*, **10**, 649–669, 1990.
- 64) D. C. Kiper, S. B. Fenstemaker and K. R. Gegenfurtner: Chromatic properties of neurons in macaque area V2. *Visual Neuroscience*, **14**, 1061–1072, 1997.
- 65) V. Walsh, J. J. Kulikowski, S. R. Butler and D. Carden: The effects of lesions of area V4 on visual abilities of macaque: Colour categorization. *Behavioural Brain Research*, **52**, 81–89, 1992.
- 66) N. Hadjikhani, A. K. Liu, A. M. Dale, P. Cavanagh and R. B. H. Tootell: Retinotopy and colour sensitivity in human visual cortical area V8, *Nature Neuroscience*, **1**, 235–241, 1998.
- 67) K. Komatsu, Y. Ideura, S. Kaji and S. Yamane: Color selectivity of neurons in the inferior temporal cortex of the awake macaque monkey. *The Journal of Neuroscience*, **12**, 408–424, 1992.
- 68) T. Yoshioka, B. M. Dow and R. G. Vautin: Neuronal mechanisms of color categorization in areas V1, V2 and V4 of macaque monkey visual cortex. *Behavioural Brain Research*, **76**, 51–70, 1996.
- 69) A. Hanazawa, H. Komatsu and I. Murakami: Neural selectivity for hue and saturation of colour in the primary visual cortex of the monkey. *European Journal of Neuroscience* **12**: 1753–1763, 2000.
- 70) H. Komatsu: Mechanisms of central color vision. *Current Opinion in Neurobiology*, **8**, 503–508, 1998.
- 71) 鯉田孝和：色覚中枢の場所と情報表現：下側頭皮質と色のカテゴリー性. *Vision*, **22**, 41–48, 2010.
- 72) D. M. J. Roberson and J. Davidoff: The “categorical perception” of colors and facial expressions: The effect of verbal interference. *Memory & Cognition*, **28**, 977–986, 2000.