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

正会員 鯉田 孝 和 (東京工業大学)

正会員 内 川 恵 二 (東京工業大学)

Multi-Stage Categorical Color Perception Revealed with a Color Space Classification Method

Member Kowa Koida and Member Keiji Uchikawa

(Tokyo Institute of Technology, Imaging Science and Engineering Laboratory)

ABSTRACT

We generally express color as some categorical color even though we have the ability to discriminate millions of colors. Most studies of categorical color perception have been based on color naming, so they have been affected by vocabulary. We have identified the locations of categorical color perception without the effect of a vocabulary by using a color space classification method. Five observers classified a set of 424 OSA color samples and an additional 6 JIS-munsell chips into several (2-14) groups. The locations of the classified categories were similarly arranged in color space across the observers. The classified categories had at least four stages, probably corresponding to multi-stage categorical color perception. Some classified categories had regions dissimilar to the categories derived with a color naming method.

KEYWORDS : color vision, categorical perception, color naming

1. はじめに

われわれは無数の色を見分けることができる。一方、多くの色の見えをわずかな色名数で表現することも一般的に行っている。例えば、虹には無数の色が存在することをわれわれは知っているが、その見えが紫・青・緑・黄・オレンジ・赤の順に並んでいると表現することもできる。つまり無数にある色の見えを、おおざっぱに分けて捉えることができるのである。色覚は網膜の3種類の錐体視細胞の出力量に応じて生じるので、それら3つを軸とした3次元空間で色を表示することができる。それぞれの軸方向で仮に100段階の弁別ができたとすると、100の3乗の100万色を見分けることができる。これに対して、色の見えを数個の色名数でも表現できるというのは、一体どのようなメカニズムを考えればよいのだろうか。

無数に存在する色をいくつかの色カテゴリーとしてまとめて捉える知覚は、カテゴリカル色知覚と呼ばれている。カテゴリカル色知覚の研究において最も重要なものに基本色名の存在がある。Berlin and Kay (1969)²⁾は世界中の98種の言語について調べた結果、発達した言語には11個の基本色名があることを見いだした。その11色名とは、red, green, yellow, blue, brown, orange, purple, pink, white, black, grayである。Boynton and Olson (1987, 1990)³⁾⁴⁾と Uchikawa and Boynton (1987)⁵⁾は、OSA色票を刺激とした単一色名によるカラーネーミングを行い、11個の基本色名は誰がいつどこで使っても安定して用いられる色名であることを示した。これらの研究から、基本色名の使用には言語や文化を越えた共通性が存在し、色知覚において普遍的な特徴を示している

と考えられている。

カテゴリカル色知覚に関する研究の多くは、カラーネーミング実験によるものであった。しかし、言語を用いる手法であるがゆえに、語彙の影響を避けることができない。そもそも、言語を用いることでカテゴリカル色知覚の本来の性質をゆがめているとも考えられる。Berlin and Kay (1969)²⁾は、言語の発達度合いによって基本色名の数は変化することと、11個に満たない言語の色名の発生順番(3.7参照)には一定の規則があることを示している。これらの事実は、カテゴリカル色知覚が必ずしも11個の基本色名とはならないことを示唆している。

また逆に、色覚メカニズムとしての色カテゴリーはもっと細かく分化しうるのは、現在の言語の発達程度がまだ足りないだけかもしれない。その可能性をBoynton and Olson (1987)³⁾は、A missing basic colorという表現で指摘している。また、内川(1988)¹⁰⁾は日本人のカラーネーミングには、基本11色以外にmizu, hadaの2色が基本色名としての特徴を満たしていることを示している。

カテゴリカル色知覚に対応したメカニズムが本当に存在しているのかどうかについて、まだ明確な証拠はない。カテゴリカル色知覚として考えられている現象は、言語による色のカテゴリー化プロセスにすぎないのかもしれない。色覚メカニズム自体にはカテゴリカルな特性は無く、単に言葉として表現・伝達するために色がカテゴリカルに処理されるだけなのかもしれない。この疑問に答えるためには、言語を用いずにカテゴリカル色知覚を調べることも必要である。

似た色を集めて色を分類するという課題で、カテゴリカル色知

覚を調べることもできる。その際、分類すべき数だけを指定して色全体を分類してもらえば、色カテゴリーの数についても調べることができると考えられる。分類の数が色カテゴリーの数に一致するときは、色分類は人によらず同じ傾向を示すだろうし、一致しなければ、数をそろえるために無理な分類が行われるのだから人による差がでるだろう。また、そもそも色覚メカニズムにカテゴリー性がほとんど無いなら、色の分類には各被験者ごとの共通性もなく、そもそも分類も困難なものになるであろう。

本研究の目的は、色全体を分類するという手法で言語を用いることなくカテゴリーカル色知覚について調べることである。色空間内にまとめられやすい領域は存在するのか、あるならばどのような分布を持つのか、そしてそれは分類の数に応じてどう変化するのか、共通の分類パターンが得られる特別な分類数は存在するのか、これらの問題について考察する。

2. 実験

2.1 装置と刺激

被験者ブースは暗幕で仕切られ、外部から光が入らないようにした。図1に示す様に、ブースの中に机が置かれる。室内はD₆₅蛍光灯4本により照明されており、机上の中心部が照度700 lxになるよう調節した。机上の色票に蛍光灯が映り込み、グレアが生じることを抑えるために、蛍光灯にルーバーを模擬した紙を取りつけた。机の大きさは90cm四方で、被験者が実験を行うのに十分な広さが用意される。机表面は、マンセル明度N5、OSA 明度L=−2に相当する灰色で塗装した。被験者は机の前に用意された椅子に座り、実験を行う。

分類刺激として用いる色票は合計430枚で、OSA 色票(424枚)とJIS マンセル色票(6枚)である。OSA 均等色空間はL(明度)軸、j(黄〜青)軸、g(緑〜赤)軸をもち、各色票を(L, j, g)座標で表現する。OSA 色票に不足している色を追加するために、N1(L, j, g=−8, 0, 0相当の黒)、N1.5(−7, 0, 0相当の黒)、5.0R3/10(−6, 2, −8相当の赤)、5.0R4/14(−4, 2, −10相当の赤)、5.0R5/12(−2, 3, −10相当の赤)、5.0R6/12(0, 2, −10相当の赤)のJIS マンセル色票を用いた。色票のサイズは5 cm四方で、机の上に全ての色票430枚が積まれてある。

図1 実験ブースの概略図

Fig.1 Schematic diagram of the apparatus.

2.2 手続き

被験者はブース内で3分以上の順応を経てから実験を開始する。机の上には全ての色票がバラバラに積まれ、被験者は色票を自由に見ることができる。実験開始時に次のインストラクションが被験者に与えられる。「色の近いもの同士をあつめて、色票全体をn個に分類して下さい。その際分類の各グループの色票の枚数は問いません。」ここでn個として与えられるのは2~14である。上限の数は14であるが、上限の設定理由は被験者拘束時間を2日に抑えることと、1グループの色票数が少なくなりすぎないことである。同一明度面にあるOSA 色票は50枚以下であるため、仮に一つの明度面を15以上に分類すると、1グループ平均3.3枚以下になってしまう。また、内川(1988)¹⁰⁾は、日本人のカラーネーミング実験から、基本11色にmizu, hadaを加えた合計13色が基本色名の特徴を満たしていると述べている。これらをふまえ、分類数14が適当な上限であるとした。

分類数nの順番はランダムとした。繰り返し試行は行わない。実験に要する時間の制限はなく、被験者が満足した時点で終了とした。分類の結果を記録し、色票をシャッフルした後に次の実験に移る。

2.3 被験者

被験者は合計5名(TS, NI, YT, HY, MN)で、22-24歳の全員色覚正常の男性である。全員とも心理物理実験の経験はなく、実験の目的、内容を知らされていない。色彩に関しての特別な教育も受けていない。

3. 結果と考察

3.1 実験結果の一例

実験結果の例として被験者NIの2分類の結果を示す(図2)。OSA空間の3次元(L, j, g)表示でプロットする。図より、色票がg値の正負(図の手前側と奥側)で2つのグループに分類されたことがわかる。

3.2 分類境界の点数付け方法

分類の結果を被験者間で比較する。異なる条件で分類されたグループが同一のカテゴリーを表しているとは限らないので、各色票ごとにデータを比較することはできない。そこで、隣接する色票との関係を見る。隣接しあう色票がそれぞれ同じグループに分類されたかどうかを評価し、同じグループであった場合は0点、異なるグループであった場合は1点として、隣接しあう色票間の midpointの座標に点数をおく。この点数を通じて条件間での比較、平均を取ることができる。この場合、色空間内で点数が高い領域は、色分類の境界を示していることになる。

3.3 jg平面の色分類の傾向

最も特徴的な傾向が見られたjg平面での結果を示す。OSA色空間内では1つの色票に対して12の等色差の隣接色票が存在する⁶⁾。図3に示すように、そのすべての組み合わせはj, g値が異なっている。よって、色票間の点数をjg平面に投影し、重なる点を平均すればjg平面での傾向を見ることができる。その結果を分類数nごとに分け、表示したのが図4である。ここでは色空間をLが0以上と0未満の2つに分けてそれぞれをjg平面に投影した。jg平面全体での傾向を見るために以下の方法で補間表示を行う。jg座標面を小領域(それぞれデータ点を頂点とした三角形)に切り分ける。データ点間を線形補間することで、三角形領域の内部の各点で点数がきまる。得られた点数を網点の濃度で表示する。特定の境界領域を境に色分類が被験者間で一致して行われて

図2 実験結果の例

分類数 $n=2$ ，被験者 NI の結果を OSA の 3 次元空間で表記する．分類された 2 つのグループを濃度で塗り分けて表現する．

Fig. 2 Result of subject NI for Classification ($n=2$).

いれば、分類の境界線がくっきりと浮かび上がると考えられる。

結果の図 4 を見ると、全体を通じて分類の境界線がくっきりと浮かび上がっている。これは被験者間で色分類の傾向が一致していることを示している。また分類の境界線は無秩序に現れているのではなく、分類数 n に従って段階を追って増えていくことがわかる。次に、この段階を大きく 4 つに分けて傾向を見る。

第 1 段階（2 分割）： $n=2, 3$ で顕著にみられる。明度 L の正負両方で $g=0$ の軸に沿った横方向の境界線で分割されている。

第 2 段階（4 分割）： $n=4 \sim 6$ でみられる。第 1 段階での j 軸方向の境界線に加えて、 $j, g=0, 0$ の無彩色点から上方向と、右下に伸びる境界線がある。これは、第 1 段階で分割された領域が部分分割されたことを示している。 $n=5$ で境界線がぼやけているが、 $n=6$ で再び境界線がはっきり現れている。

第 3 段階（新たに 1 つの部分分割、1 つの領域の発生）： $n=7 \sim 9$ でみられる。第 2 段階での分割領域がさらに部分分割されている。高明度 ($L: 0$ 以上) 側で無彩色点から左下方向に伸びる境界線 ($n=8$ 以上)、低明度 ($L: 0$ 未満) 側で無彩色点から下方向に伸びる境界線 ($n=7$ 以上) が出現する。この 2 つの境界線は、同種の境界面から得られたものであり、明度に応じて ig 面での位

図3 OSA 色票の 12 近傍とその中間点、および中間点の ig 投影面での座標
図上部の立体的に配置した正方形が各色票の存在する座標である。丸点は各色票間の中間点の座標であり、この点に分類の点数を与える。これらの点を ig 面に投影すると図の下部のような分布になる。4 本の矢印は投影の例である。

Fig. 3 Schematic diagram of arrangement in a part of OSA color space.

置が変化しているものである。これについては後述する。同時に ($n=8$ 以上)、低明度 ($L: 0$ 未満) 側で $j, g=-3, -3$ 近辺の領域を包囲するような境界線が現れている。

第 4 段階（新たな 2 つの部分分割、1 つの領域の発生）： $n=11$ 以上の低明度 ($L: 0$ 未満) 側で、第 3 段階で現れた包囲領域の下側の低 g 値方向に境界線が現れる。 $n=12$ の高明度 ($L: 0$ 以上) 側で $g=0$ 軸上の j 値が高い領域を挟みこむ境界線が現れる。 $n=13$ の低明度 ($L: 0$ 未満) 側で無彩色点から右上に伸びる境界線が現れる。

3.4 明度方向の色分類の傾向

ig 平面に投影した図からは、明度に応じた色分類の傾向を見ることができない。明度方向での傾向について示すために次の手続きをおこなう。

ig 平面での特徴として、色分類の境界線の多くは原点（無彩色点）から放射状に伸びているということがあった（図 4 参照）。これは等色相線と似た特性であると考えられる。そこで、 ig 座標を極座標表示に変換する。ここで方位角を Hue angle と呼ぶことにする。Hue angle ごとに色分類された領域は、原点からの放射方向にデータを投影することでより明確に傾向を見ることが出来る。その投影図を Hue angle- L 面グラフとして示すことで、明度 L 方向の傾向について確認できると考えられる。

ただし、Hue angle- L 面の投影について、3 つの注意点がある。第 1 に、原点近傍のデータは無彩色に近く、色相による傾向を示すのに不適当であると考えられる。そのため、各明度面での原点近傍のデータ点（原点からの距離 2 以下）は投影していない。第 2 に、Hue angle- L 面への投影は、明度に応じた傾向を見るのが目的である。ここでは表示しないが、全てのデータ点を投影した図は乱雑さが高かった。明度差間の傾向の違いをよりはっきりさせるため、同じ明度面内での隣接色票間のデータ点は省略した。第 3 に、Hue angle を 6 度刻みでデータ点をひとまとめにした。

図4 jg 平面へ投影した色分類の結果

分類の数 (n) ごとに表示する。色空間を L が 0 以上, 0 未満で 2 つに分けて jg 平面に投影し, 被験者間で平均した結果を示す。データ点が存在する領域を補間して網点の濃度で分類境界の点数を表示する。等高線は, 分類境界の点数が 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0 となる線上で引いてある。外周部の白い領域は, データ点が存在しない領域である。

Fig. 4 Classification boundaries projected onto $j-g$ plane.

図4 (つづき)
Fig. 4 (continued)

図4 (つづき)
Fig.4 (continued)

データ点の個数は、第1象限から順番に509, 338, 353, 858個である。jg平面での第2象限(Hue angle 90~180度)と第3象限(Hue angle 180~270度)のデータ点は相対的に少ない。データ点の少ない第2象限でも、平均で20個以上のデータが、Hue angleの各サンプリング領域に含まれるように、一つの象限を15分割(各領域: 6度)した。

色分類の数全体を通じての傾向を図5に示す。図4のjg平面への投影と比較すると境界線ははっきりと浮かび上がっていない。比較的傾向が見られる境界線の多くはL軸方向に並んでいる。L軸方向の境界線が多いというのは、色分類が主にHue angleによって行われていたことを示している。つまり、明度による分割は、相対的に少ないといえる。

次に、分類数nの順を追って傾向を見る。n=6までの、分類数が少ない条件では明度による分割に共通性はみられない。分類数n=6までというのは先に述べた第2段階に相当する。第3段階と考えられるn=7では、Hue angle 90から180度の範囲(jg面での第2象限)でL=-2を境界とした明度方向の分割が見られる。L軸にほぼ直交する境界線を描いているので、jg投影面では確認できなかったものである。n=8~11では、Hue angle 270度近辺のL: 0以上の領域を囲む形の境界線が描かれている。この傾向は図4のjg投影面で示されたものと一致する。第4段階としてn=10で、Hue angle 0から90度の範囲(jg面での第1象限)でL=-1近傍を境とした明度方向の分割が見られる。ほぼL軸に直交する境界線を描いているので、jg投影面では確認できなかったものである。さらにこの象限は、高明度側でHue angle 60度を境に分割され、低明度(L<-3)側では幅広く一つに分類がなされている。

3.5 無彩色の分類

無彩色の分類が得られているかどうかについては、図4, 5のグラフでは示すことができない。jg平面内で無彩色の色票は1枚であることと、実験で用いたOSAの近傍色票としてj, g値が同じでLだけが異なるものはないことが原因である。各被験者は、無彩色の色票を次のように分類した。被験者TS; すべての分類数で無彩色の分類なし。NI; 5分類のみ白, 9分類以上で灰色の領域を分類する。YT; 8分類以上で白, 13分類以上で灰色を分類する。HY; 6分類のみ白, 11分類のみ灰色を分類する。MN; 3分類以上すべて無彩色の分類を行う。ただし明度方向の分離はされていない。以上の結果から、無彩色は分類の第4段階(分類数nが11以上のとき)で登場するのではないかと考えられる。

また、明度の高低で無彩色を分類する傾向には、一致はみられなかった。

3.6 分類数と分類境界の一致度

jg平面での傾向として、色分類の境界線がn=5でぼやけた後にn=6で再びくっきりと現れることがあった(図4参照)。このように、分類のしやすさに変化が起きる特定の分類数があるようである。また、1.はじめに述べた共通の分類パターンが得られやすい特別な分類数は存在するののかという疑問を確かめるために、分類境界の一致度について考察する。

全色票間の隣接するペアの数は2058ある。各被験者の色分類の結果から境界の数が何個あるのかを数えたのが図6の折れ線グラフである。◆印でしめす点が全被験者の平均である。分類数n(横軸)が増えるに従って、境界の数が増えている。次に、5人の被験者で一致した境界の数を数える。3人の一致、4人の一致、全員の一致とわけて表示したのが図6の棒グラフである。こちらも分類数n(横軸)に従って増加している。また、分類数nが増えるにつれて棒グラフの高さが全被験者の平均の境界数(◆)に近づいている。

ここで、色分類の境界が被験者ごとに完全に無秩序だった場合を仮定する。すると、各被験者の分類境界の数(図6の◆印)から計算することで各被験者の分類境界が一致する期待値を求めることができる。各点での分類境界の存在確率は、“全被験者の平均の境界数÷2058”で与えられる。これを各被験者ごとに求め、分類境界が少なくとも3人以上一致する期待値を計算する。この期待値と実験結果の3人以上一致した分類境界の数との比をとることで、分類境界の一致指数とする。

分類境界の一致指数を分類数nごとに示したのが図7である。すべての値が1以上であり、完全に無秩序に分類されたときの期待値1より一致度が高い。図7の曲線は、単調減少の指数関数による近似曲線である。この近似曲線との比較から、一致度は分類数n=3, 4, 6, 10で高く、この傾向は図4, 5での、境界線がくっきりと浮かび上がった分類数と一致している。

3.7 言語の進化による基本色名の発生順との比較

Berlin and Kay (1969)²⁾は、基本色名の数が11個に満たない言語についても調べ、言語の進化による色名の発生順には一定の法則があることを示した。言語の進化による典型的な発生順は、白・黒<赤<緑・黄色<青<茶<ピンク・紫・オレンジ・グレーであるとしている。ただし、ここでの色名は便宜上名付けられているものである。この法則は、本研究の色分類の数に応じた分類傾向とどのような関係があるのだろうか。

Berlinらの基本色名の分布との関係を本研究と同じOSA色空間で比較する。Berlinらの実験は、マンセル色票群から彩度の高

図5 Hue angle-L 面へ投影した色分類の結果

分類の数 (n) ごとに、被験者間で平均した結果を示す。データ点が存在する領域を補間して網点の濃度で分類境界の点数を表示する。Hue angle は、 j 軸正方向を 0 度として反時計回りに正の回転角として計算した値である。白色点近傍のデータ点と、等明度内での比較で得られたデータ点は除外してある。Hue angle のデータ座標は 6 度ごとにひとまとめにして計算されてある。

Fig. 5 Classification boundaries projected onto Hue-L shell.

図8 Berlin and Kay による、基本色名の数11以下の言語での基本色の発生順
マンセル色票の色度点から OSA $j-g$ 座標に変換しプロットする。図4との対応をとるために明度 $L=0$ で2つに分けて表示する。言語の進化による色名の発生
のステージは7段階あるとされており、そのなかで色度による分化が起きるステージIII以降の6つのステージについて示す。煩雑さを避けるため白、黒は表
示しない。各シンボルの色名は以下の通りである。■：正方形が赤、●：丸が緑、○：白丸が黄、×：ばつ印が青、#：井戸型が茶、▼：逆三角形がピンク、△：
上三角形が紫、◆：菱形がオレンジ。

Fig. 8 The evolution of basic color terms projected onto $j-g$ plane (from Berlin and Kay 1969).

参 考 文 献

- (1) 内川恵二：色覚のメカニズム，朝倉書店，p.155-156(1998)。
- (2) Berlin, B. and Kay, P. : Basic Color Terms, Their Universality and Evolution, University of California Press, Berkeley (1969)。
- (3) Boynton, R. M. and Olson, C. X. : Locating basic colors in the OSA space, Color Res. Appl., 12, pp.94-105 (1987)。
- (4) Boynton, R. M. and Olson, C. X. : Salience of chromatic basic color terms confirmed by three measures, Vision Res., 30, pp.1311-1317 (1990)。
- (5) Uchikawa, K. and Boynton, R. M. : Categorical color perception of Japanese observers : Comparison with that of Americans, Vision Res., 27, pp.1825-1833 (1987)。
- (6) MacAdam, D. L. : Uniform Color Scales, J. Opt. Soc. Am., 64, pp.1691-1702 (1974)。
- (7) Nickerson, D. : OSA Uniform Color Scale samples : A unique set, Color Res. Appl., 6, pp.7-33 (1981)。
- (8) Wyszecki, G. and Stiles, W. S. : Color Science, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York (1982)。
- (9) Hardin, C. L. and Maffi, L. : Color categories in thought and language, Cambridge University Press, Cambridge (1997)。
- (10) 内川恵二：表面色のカテゴリカル知覚，光学，17，p.661-669 (1988)。

(受付日1999年11月8日/採録日2000年3月2日)

鯉田 孝和 (正会員)

東京工業大学工学部像情報工学研究施設
(大学院総合理工学研究科物理情報工学専攻)

昭和48年2月12日生まれ。平成7年3月東京工業大学理学部応用物理学卒業。平成9年3月東京工業大学大学院総合理工学研究科知能科学専攻修士課程修了。現在同大学院総合理工学研究科物理情報工学専攻博士課程に在学中。日本学術振興会特別研究員。色覚メカニズムについて研究。日本視覚学会，日本光学会，映像情報メディア学会，ARVO，OSA 会員。

内川 恵二 (正会員)

東京工業大学工学部像情報工学研究施設

昭和25年12月30日生まれ。昭和49年3月東京工業大学工学部電子物理工学科卒業。50年～51年英国キール大学コミュニケーション神経科学学科留学。55年3月東京工業大学大学院総合理工学研究科物理情報工学専攻博士課程修了。カナダ，ヨーク大学博士研究員を経て，現在，東京工業大学工学部像情報工学研究施設教授。専門は視覚情報処理，色覚認識。日本視覚学会，日本光学会，応用物理学会，OSA，ARVO等所属。工学博士。昭和60年3月照明学会研究奨励賞，昭和62年3月光学論文賞受賞。