

色の錯視とは何か

栗 木 一 郎

What Are ‘Color Illusions’ ?

Ichiro KURIKI

What are ‘color illusions?’ Color is a subjective experience and is impossible to be defined with physical measures. Color appearance is frequently recalibrated in the daily life to adapt illuminant changes, i.e. color constancy. However, different from other visual attributes like shape, motion and depth, no information from other senses is available for the recalibration of color. Color constancy yields different color percept from physically identical rays, which implies that color appearance is an “illusory” phenomenon by itself. Therefore, phenomena with color appearance that are out of predictions based on the range of daily experience could be classified as ‘color illusions.’ As examples of color illusion, Land’s two color projection, color-dungeon illusion and Muncher illusion will be introduced after a tiny introduction about theoretical models of color constancy.

Key words: color, illusion, adaptation, nonlinearity, Land’s two-color projection

錯視とは「本来あるべき姿とは異なる見え方」を意味する語である。特に「錯」という字は、「ありえない」とか「あってはならない」という意味の間違いを含意する文字である。典型的な錯視としては、例えば物理的にはまっすぐな線分が曲がって見えとか、物理的には同じ長さのものが異なる長さに見える、などの状態を指す。「物理的には」という言葉を添えたのは、「色」は物理的には定義できないためである。

色は、曲率や長さと異なり、触覚など他の感覚モダリティで状況を確認あるいは校正する手だてがない。棒の曲がり具合や角のとがり具合、奥行き感／距離感、動く速度、ざらざら感などの情報は手や口などの触覚器を用いて感じることができる。幼児が口に物を運んで確かめるのも、触覚器としての手と口の間での情報の校正や、視覚情報等の他の感覚器との整合性を確認するために行われていると考えられている。しかし色は、視覚情報のみに依拠して脳の中で作り出される信号である。唯一の物理指標になると思われる波長も、視覚系の順応によって色感覚の基準点である無彩色点、すなわち主観的に色味を感じない光の

色度がずれてしまうと（後述の「色恒常性」参照）、色の知覚*1とは1:1に対応しない。

ニュートンが著書“*Opticks*”で言及したように、「光には色はついていない。その波長構成に応じてさまざまな色の感覚が頭の中で醸成」されている。色情報が脳の中で作り出されている事を端的に示す例が脳性色覚異常である。脳の疾患によってある特定の部位の機能が障害されると、色が知覚できなくなる。この状態になった患者は、あるとき自分の見ている世界が白黒になったと感じると訴える。形態覚に異常をきたすことなく色覚のみを失うことがある、ということはすなわち、脳内のどこかのレベルにおいて、色情報は他の視覚情報とは独立した経路で処理されている可能性を示している。

さて、話をもとへ戻すと、「色」の「錯視」とは何を指すのだろうか。たとえば「物理的に同一の光に対し、異なる色を感じる」という定義に当てはまる現象は「色の錯視」たりうるだろうか。ところが後述のように、このような現象は日常的に起きている（色恒常性）ため、このような定義を色の「錯」視だとしてしまうと、日常の色覚体験

東北大学電気通信研究所 (〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1) E-mail: ikuriki@iec.tohoku.ac.jp

*1 色の絵画的な知覚 / 見え方を専門用語では「色の見え」(color appearance) と呼ぶ。

のほとんどは錯視だということになる。つまり、直線の曲率やら長さやらと同じ尺度で考えてしまうと、日常の色の見え方自体が錯視だといっても過言ではない。では、「日常的な経験からは予測できない色の見え方」を色の錯視というべきだろうか。だとすると、何が日常の色の見えを構成する現象で、どこからが日常性を逸脱した知覚なのかを理解しない限り、「色の錯視」とは何かを定義できないことになる。

本稿では、日常的な色の見えを構成するメカニズムについて概説すると同時に、色の錯視の錯視たるゆえんについて考察を試みる。

1. 色 恒 常 性

照明光のスペクトルが変化すると、その光を受けて反射している反射表面が反射・散乱する光のスペクトルも当然変化する。しかしながら、われわれは屋外や屋内、朝昼晩における太陽光など照明スペクトル環境の変化にもかかわらず、同一の物体の色が変化するような知覚を感じることはない。これが色恒常性である。裏を返すと、スペクトルが変化する光から同一の色を知覚するのだから、物理的な光の変化を知覚できないのは一種の錯視といえるかもしれない。ただ、騙されているのではなく、むしろ積極的に知覚を安定化するための機構の結果だと考えるべきだろう。現に、大脳性色覚異常の患者には色恒常性の機能を損失する場合がある。

話の見通しをよくするために、簡単な色恒常性のモデルを導入する。照明光のスペクトルが偏るということは、その照明光を共有している物体すべてからの反射光のスペクトルがある波長帯域に偏るということであり、それを補正する解決策のひとつとして光センサー（錐体）間の感度バランスを変化させる方法がある。通常、以下のような式によって表される。

$$\begin{bmatrix} L' \\ M' \\ S' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_L & 0 & 0 \\ 0 & k_M & 0 \\ 0 & 0 & k_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} \quad (1)$$

右辺の $[L; M; S]$ はある観察対象から網膜に飛来する光によって生じる網膜の3種類の錐体応答であり、左辺の $[L'; M'; S']$ は感度変化後の錐体応答信号を表している。 $k_{[L, M, S]}$ を対角要素とする正方行列は感度変換マトリクスである。このモデルは提唱者の名前をとり「フォン・クリース型モデル」、 $k_{[L, M, S]}$ はフォン・クリース係数と呼ばれている¹⁾。係数行列が対角要素しかもたないことから、このモデルでは、各錐体に独立に係数を重畳する形になっている。一次

近似としては比較的精度が高い^{2,3)} ため多くの色順応モデルがこの形式をとっているが、モデル間の違いはおもに係数 $k_{[L, M, S]}$ をどのように定義するかの違いである^{4,5)}。フォン・クリースによる元々のモデル¹⁾ は、係数を照明光に対する錐体応答の逆数としていた。例えば「 $L'=M'=S'$ の場合に白色の色が見える」という関係が成立すると仮定すると、照明光によって生じる $[L; M; S]$ の変化を照明光に対する錐体応答の逆数でキャンセルしてしまえば、完全な色恒常性を得ることができるはずである。

おそらく、初めてこの問題に接する読者は、照明光による色変化を100%キャンセルする処理がベストだと考えられているのではないだろうか。そうすることで、照明環境の影響を全く受けない物体のアイデンティティーが得られるからである。しかし、照明光による影響を何%除去する（色恒常性の成立度あるいは順応%）のが最善かは、実際には処理後の信号の用途によって異なる。結論を先に言うと、物体のアイデンティティーを認識させる機械アルゴリズムを構築する場合には100%順応が適しているが、絵画的な視覚体験と一致する（見たままを記録するような）画像を取得しようとする場合には中間的な色順応%を適切に用いる必要がある。

例えば被験者に、「どういう反射特性の物体表面か？」という物体のアイデンティティーを問う課題を与えると、日常の照明光の範囲では、色恒常性の成立度はほぼ100%になる⁶⁾。しかし、「その物体を写實的に描く」とすると何色の絵の具を選ぶか？」という「色の見え」を問う課題を同じ被験者に与えると、照明光の色度によって色恒常性の成立度が変化し、一般に有彩色照明の下での成立度は70~80%程度になるが、照明光が単色光（トンネル照明の低圧ナトリウムランプが好例）でなければ50%を切ることはほとんどないことがわかっている^{7,8)}。もう少し補足すると、物体のアイデンティティーあるいは属性としての色は、見た目の色とは少し違う次元の色情報である。例えば白熱電球の下で白い紙を見ると、「白い紙」だと感じる知覚と同時に「黄色みを帯びた白」という見かけの色の知覚とが存在する。「白い紙」だという知覚は物体のアイデンティティーとしての知覚であり、光の当たり方の強弱によって微妙な明暗を示す絵画的な視知覚とは異なっている。この情景を写實的に描こうとした時に、白い紙の部分を黄色っぽく塗るほうがより視覚的体験に忠実だと思われる人が多いだろう。しかし、その色は電球が持っている色度から予想される色よりはるかに黄色みが少ないのも、また事実である。

フィルム式カメラで写真を撮影した経験のある方はご存

知だと思われるが、フラッシュを使わずに白熱電球の下で写真撮影を行い、特別な色補正をせずにプリントすると、その場で体験した色よりはるかに強いオレンジ色を帯びて見える。デジタルカメラでも手動で白色点を太陽光に固定できるものであれば、同じ経験が可能はずだ。太陽光の下で人間の見た目と近い色に写るように感度が調節されているシステム（フィルム、デジタルカメラ）で白熱電球の下での視野を撮影しても、フラッシュを使ったり白色点を白熱電球下の白い紙に合わせたりしても、撮影された写真の色は視覚体験と合致しない、という経験はだれしもお持ちだろう。もし視覚系の色順応が0%だったら、フラッシュを使わずに銀塩フィルムのように撮った画像が視覚体験と一致するはずである。逆に色順応が100%だったら、フラッシュを使った色補正が視覚体験と最も一致するはずである。この現象はすなわち、人間の視覚系の照明光に対する順応が0%でも100%でもないことを示している。

2. レティネクス理論と「ランドの二色法」

ポラロイド写真の発明者として有名なエドウィン・H・ランド (1909-1991) は、熱心な視覚研究者でもあった。特に晩年まで研究を続けていたレティネクス理論^{9,10)}は視覚の持つ基本的な空間情報処理の本質を鋭く捉えた理論として有名である。あくまで筆者自身の推測だが、ランドは色恒常性を持つ人間が経験する「色の見え」をそのまま自動的に撮れる写真システムを考案しようとしていたのだと思う。しかし、以下の理由から、ランドのレティネクス理論は写実的な視覚体験を切り取るメカニズムというよりは、物体表面のアイデンティティを記号的に認識するメカニズムを模していたと考えるべきだと思う。

レティネクス・アルゴリズム^{9,10)}は、入力画像をRGBの三原色に分類した後の各原色の画像に対して適用される。アルゴリズムの要点は、(1) 急激な輝度の変化が物体のエッジであると仮定してその比は保持し、(2) 画像内のゆるやかな輝度勾配を無視する、というアルゴリズムである。最後にその処理を施した三原色画像を統合して色恒常性を得ようとした。しかし、統合する際に3つの原色で最高の輝度を持つ部分で強度分布を正規化し白 (R=G=B) に割り当てる、と定義しているため、100%順応を念頭に考えていると思われる。また、照明光の当たり方によって生じる陰影を除去する処理を行っていることから、このアルゴリズムを厳密に適用すると写実的な視覚体験とは異なった画像が生成され、どちらかというと物体表面のアイ

デンティティを表した画像となる。したがって、レティネクス理論は写実的な視覚世界を写し取るためのアルゴリズムではなく、物体表面のアイデンティティを取得するためのアルゴリズムと考えるべきであろう。

さてランドのレティネクス理論では、前述のような空間的な処理を施した後でRGBのチャンネルごとの感度調整として100%順応を仮定しているため、式(1)の係数 $k_{\{L, M, S\}}$ で表すと照明光の色度の逆数で定義したフォン・クリースの式と同じ形になる。

$$k_L = C/L_{\text{illum}}, k_M = C/M_{\text{illum}}, k_S = C/S_{\text{illum}} \quad (2)$$

ただし、 C は信号強度を正規化するための適当な定数とする。もし順応が100%でなく、白色点に変化前後の照明光の途中までしか移動しないとすると、係数は以下のような式で表されることになる。

$$k_L = C \left(\frac{t}{L_{\text{illum1}}} + \frac{1-t}{L_{\text{illum2}}} \right), k_M = C \left(\frac{t}{M_{\text{illum1}}} + \frac{1-t}{M_{\text{illum2}}} \right), \\ k_S = C \left(\frac{t}{S_{\text{illum1}}} + \frac{1-t}{S_{\text{illum2}}} \right) \quad (3)$$

ここで、添字のillum1, illum2は2つの照明光に対する3錐体の応答を示している。また、 t は色順応の度合いを示す変数で、 $t=1$ ではillum1に、 $t=0$ ではillum2に完全順応することに相当する。実際には、 t は照明光の色度 ($L_{\text{illum}\{1,2\}}$, $M_{\text{illum}\{1,2\}}$, $S_{\text{illum}\{1,2\}}$) の関数であるため¹¹⁾、結果として3錐体が完全に独立した感度調整メカニズムとなりえないことがわかる。

さて、ここで「ランドの二色法¹²⁾」(Land's two-color projection) という有名なデモをご紹介します。これは前述のランドが発見した画像の呈示方法で、オリジナルのデモはスライドとプロジェクターを用いて実演された。RGBの三原色に分解した画像のうち、Rの画像を赤い光で(図1(b))、Gの画像を白い光で投影し(図1(c))、重ね合わせると緑や薄い青が知覚される現象である(図1(d))*²。赤と白の光だけで構成されているということは、白・灰・黒に加え赤・褐色・ピンクしか見えないはずだが、画像からは緑や薄い青が知覚される、という点は日常的に予測可能な色の見え方を逸脱しており、「錯視」として認めても差し支えないだろう。

図1(d)に写っているマクベス・カラーチェッカーの個々の色票に対し、標準光源下のグレイ背景上に呈示した刺激で色の見え方を評価させ、CIE xy色度上にプロット

*² http://www.vision.riec.tohoku.ac.jp/ikuriki/Land_two_color-j/index.html

すると、図 2 (b) に□シンボルで示したようにその軌跡が湾曲する。色を座標として表す CIE 色度図では、CRT の色再現領域は三原色 (R, G, B) を頂点とする三角形で表される。この座標系の中で、ランドの二色法の全画素がもつ色はディスプレイの白色点と赤の頂点を結ぶ直線の上に分布する (図 2 (a))。したがって、もし人間の視覚系が画像のもつ色の分布に全く適応しないのであれば、白・灰色・黒と、赤・褐色しか見えてはいけなければならないはずである。しかし実際には、被験者には緑や水色が見える。

さて、前章でご紹介した色の見えモデルでこの現象の背景に存在する視覚メカニズムの理解を試みる。例えば、白色の表面に対する感度変化後の錐体応答 [L' ; M' ; S'] が、等エネルギー白色点 $(x, y) = (1/3, 1/3)$ と一致するように係数 $k_{[L, M, S]}$ を設定する。式 (1) の線形変換を用いた場合、図 2 (a) に示したように画像の色度分布が CIE xy 色度図上では直線に変換される。これでは依然として人間の見え方のように湾曲した軌跡 (図 2 (b) 中の□シンボル) が現れない。赤、無彩色と緑が見えることはこれでも説明可能だとしても、青みが感じられる現象は説明できない。色度図は、本来三次元 (錐体が 3 種類存在するため) の色空間において輝度情報を潰した二次元座標系なので、色度図上で直線上に乗る光は三次元空間の色度図の中では平面内に分布が限定されていることを示している。それに対し、図 2 (b) 中の湾曲した赤線や□シンボルの軌跡は、色の見えが三次元の広がりをもっていることを示している。画像中には存在しない、この第三の次元はどこから現れるのか。

単色光の照明 (例えば 620 nm) の下でグレイスケールを観察すると、明るい色票は照明光の色 (この例では赤) に、暗い色票は照明光と反対の色 (この例では緑) に知覚される、という現象がある。この現象はヘルソン=ジャッド効果¹³⁻¹⁵⁾として知られているが、この見え方を先ほどの式のように表そうとすると、 $k_{[L, M, S]}$ が照明光の色度 (これも L, M, S の関数として表せる) と色を評価する対象の明度 (輝度の関数) をパラメーターとした関数でなければならない。観察対象が視空間の中で相対的に明るい物体か暗い物体か (明度) を式に考慮すると、以下のような表式になる。

$$k_{\begin{Bmatrix} L \\ M \\ S \end{Bmatrix}} = f_{\begin{Bmatrix} L \\ M \\ S \end{Bmatrix}}(L_{\text{illum}}, M_{\text{illum}}, S_{\text{illum}}, I_o) \quad (4)$$

ここで I_o は観察対象物の視野内における相対的な輝度の対数 (明度に近い尺度) を示している。対象物の相対的な輝度を評価する必要があるということは、視野内に分布す

る空間的な情報を考慮する必要があるということになる。「明度」(lightness) とは物体表面における光の反射率に対応する知覚であるが、明度を判定するには、視野中のどの輝度を最大明度および最低明度に設定するかを決める必要がある。視野中の最大輝度は必ずしも白色ではない。例えば光沢をもつ物体の表面における鏡面反射は、文字通り鏡のように入射光を正反射する。鏡面反射光の強度は、同じ照明条件下における白色表面の拡散反射光よりも 1,000 倍近くの強いエネルギーを有する場合がある。何らかの画像的な統計量 (輝度ヒストグラム等) を使って除去しようとすると、一律に閾値を設定することが難しい。では、視野中の鏡面反射をのぞいた最大強度が必ず白色かという、白色の物体が視野中に存在するとも限らず、また、存在したとしても照明の陰になっていれば最大輝度を示すとも限らない。前述のレティネクス理論では照明光の傾斜を除去するアルゴリズムが実装されているが、レティネクス理論に鏡面反射による光沢を除去するなどのアルゴリズムを付加していくことによって、あるいはこのパラメーター I_o の推定が可能となるかもしれない。

さて、有彩色照明の下での視覚系の感度変化の様子を心理物理学的に計測すると、照明光の色度および観察対象の相対的輝度比の関数として、式 (4) を具体的に導出することができる¹⁶⁾。L, M 錐体に関するシステムは線形、S 錐体に関するシステムは非線形とするモデル¹⁷⁾や、背景に対して相対輝度が高い対象と低い対象とで係数が切り替わるとするモデル^{18, 19)}などが存在するが、われわれの研究結果では、式 (4) の関数は比較的簡単な対数線形式で近似することができることが示されている¹⁶⁾。

明度の評価が既知だと仮定し、式 (4) をランドの二色法の画像に適用してみると、図 2 (b) に描かれたような若干湾曲した三日月型の赤い軌跡が現れる。心理物理実験の結果 (□シンボル) ほどの強い湾曲は現れていないが、非線形変換によってわずかに画像の色度分布が曲線状に歪み、「第三の次元」が生じる様子を示している。人間の視覚系には、低いコントラストの色信号を強調して知覚する性質があり、それを色域拡張 (gamut expansion²⁰⁾) と呼ぶ。式 (4) ではわずかな湾曲しか現れないが、このようにして生み出された第三の次元が色域拡張によって強調されると、心理物理実験の結果 (図 2 (b) □シンボル) のような強い湾曲が現れるのではないかと推測される。

このような非線形な特性は、等エネルギー白色に近い色度をもつ比較的白っぽい照明光の下では現れにくい、自覚的に照明光の色みを感じることが出来る程度の有彩色照明の下では顕在化してくる。まとめると、ランドの二色法

は、視覚系がどのようにして色の見え方の原点（＝無彩色点）を決めているかという問題と密接に関連する現象であると考えることができる。

3. 色の錯視

さて、視覚系が環境に適応して感度を変化するシステムは、前述のように線形に近いながらも系統的な非線形性をもつ過程であることがわかった。ここから逸脱した色の見え方は、色の錯視と呼ぶことができるかもしれない。例えば、1枚の絵の中で、同じ色で作図された2箇所の色の見え方が異なる、などが端的な例である。このような色の見え方はおもに色の見えにかかわる空間的なメカニズムの影響であると考えることができる。

3.1 同化・対比とダンジョン錯視

例として「色のダンジョン（土牢）錯視」をご紹介する。元々のダンジョン錯視²¹⁾は無彩色であり、それをカラーに発展させた作品*³である。これは古典的には「色の同化」と呼ばれる現象と、「色の対比」と呼ばれる現象の2つの効果が重畳したものである。例えば、図3(a)に示された4つの矢印は4色の違う色に見えるが、行方向ではまったく同一である（偶数行と奇数行は異なる色）。「同じ色で塗られた部分が異なる色に見える」という意味で、常識的な推測の範囲を逸脱した色の見え方を示す錯視である。図3(a)、(c)、(d)は説明のために図の構成要素を大きくしているが、構成要素を小さくした図3(b)においても強い錯視が見えていと思う。図3(c)は、中央の矢印を取り囲むマスをすべてグレイに塗った場合で、これは格子の色の違いの効果を示している。図3(d)は格子を外した図で、これは背景色の効果を示している。(c)のように対象の中に細かく入り込んだ要素が色の見えに影響を及ぼす効果を色同化、(d)のように対象にそれを取り囲む領域の補色が誘導される効果を色対比という。

色を見るメカニズムの空間周波数特性は低域通過型であることが知られており²²⁾、同化はこの特性を反映した現象であると考えられている。低域通過型の画像フィルターを適用すると同化と同傾向の色の変化を見ることができ、実際には輝度エッジがシャープに知覚される。これは、色の情報と輪郭（形状）の情報はいったん分離して情報処理された後で、輝度の枠の中に色を当てはめるような統合過程²³⁾が関与していると考えられる。一方の対比は、空間的に拮抗的な関係をもつ受容野構造が反映されて生じている現象だと考えられている。印刷で再現されてい

るかは定かではないが、(a)の「矢印」の色は(c)とも(d)とも異なって見えるのではないだろうか。「色のダンジョン錯視」は(c)の格子の効果だけではなく、(d)の対比による効果も加わっていることがこの図からわかる。

3.2 ムンカー錯視（ホワイトの効果）

最後にムンカー錯視²⁴⁾をご紹介する。無彩色版の同図形は、ホワイトの効果（White's effect）²⁵⁾と呼ばれる。図4(a)、(b)のように、矩形波状の縞の間に挿入された四角形の見え方が、挿入された帯の明るさ（図4(a)）や色（図4(b)）によって異なるという現象である。「同じ色で塗られた部分が異なる色に見える」という意味では前述の色のダンジョン錯視と同じだが、そのメカニズムが研究者の想定を大きく超越している。図4(a)、(b)で四角形に中心が当てはまる中心-周辺拮抗型の側抑制の受容野を想定すると、中心部の四角形に対して抑制性の影響を与える両脇の帯とは逆の色が四角形に誘導されてしかるべきである。例えば白黒の場合、両脇を黒帯に挟まれた四角形は明るく見えるべきだが、実際には白帯に挟まれた四角形のほうが明るく見える（図4(b)）。また、緑の帯に挟まれた四角形は紫に挟まれた四角形より赤みを帯びて見えるべきだが、実際にはその逆が起きている（図4(a)）。どちらかという四角形が鎮座している帯の補色が誘導されているように見え、しかもこの傾向は帯の幅を細くすると（図4(c)、(d)）より顕著に現れる。高い空間周波数による同化が原因だとしたら、帯の色の面積は2色ともほぼ同じであるため、必ずしも当てはまらない。矢印（→）で示されたテスト領域の分の面積差によって錯視が生じるとしたら、テスト領域の高さを減じれば錯視は減るはずだが、それも真ではない。この錯視のメカニズムはまだ確定的ではないが、単純な受容野構造や空間周波数フィルターによって予測可能ではなく、どうやら図形の配置から「何か」べつの手がかりを読み取って色の見え方を判断していると考えられる^{26, 27)}。

錯視現象や錯視図形は、視覚系の特性を解くひとつのきっかけとして重要な役割を担っている。これまでの視覚科学の研究では、上述のように、錯視図形を分解して色同化あるいは色対比といった要素現象ごとの特性を調べ、それらを加算することでものを見るメカニズムを理解しようとしてきた。しかし、神経細胞の多段結合によって構築されているシステムが完全に線形であるはずはなく、また色同化や色対比といった枠組みも研究者側の都合でそのよう

*³ <http://www.psy.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/saishin22.html>

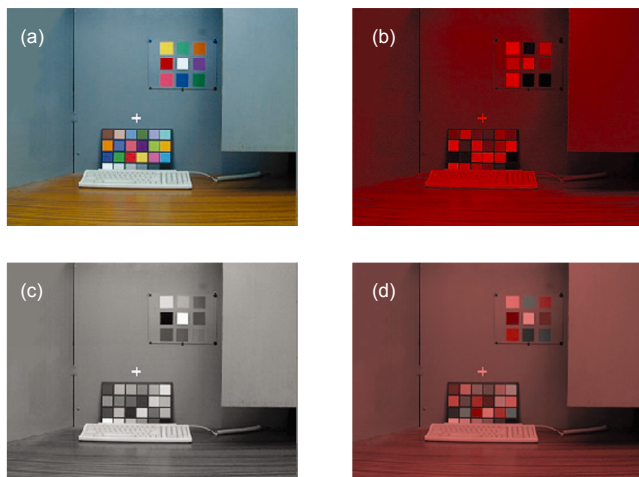


図1 ランドルの二色法. (a) 原画像. (b) 赤成分だけを抜き出し、赤 / 黒で表示した画像. (c) 緑成分だけを抜き出し、白 / 黒で表示した画像. (d) (b) と (c) を混ぜ合わせた画像. チャートの色票の中に、緑や水色が見える.

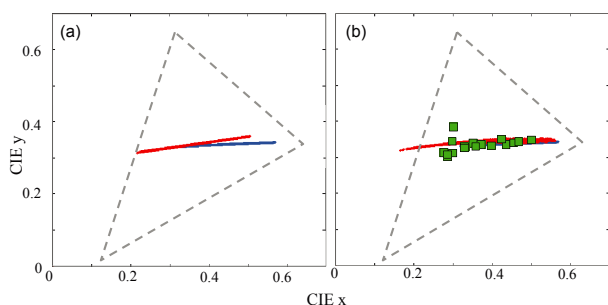


図2 図1の画像 (d) に含まれる色度と、それを変換した色度を CIE xy 座標系に示した図. (a) 原画像のもつ色度分布 (青線) と、画像中の白色の色票が等エネルギー白色 ($x=y=0.333$) に一致するように式 (1) の係数を定義して変換した色度 (赤線) を示している. 直線が直線に写像される. (b) 原画像の色度 (青線) と、画像内の色票の色の見えを被験者がマッチングした結果 (□シンボル). わずかに曲がった赤線は式 (4) を適用して変換した色度の分布.

に分けられているだけで、必ずしも個々の要素現象に完全に合致した特性をもつ神経細胞が存在するわけではない可能性が高い.

色覚研究者は輝度によるアーティファクトを嫌って等輝度で実験をする場合が多いが、輝度変化を伴わない図形というのは日常では稀であり、したがって等輝度条件下で測定した特性はあまり日常的な特性を反映していないと考えたほうが自然であろう. 例えば脳の神経細胞では、輝度差を伴う刺激に対するほうが、等輝度刺激に対するよりも

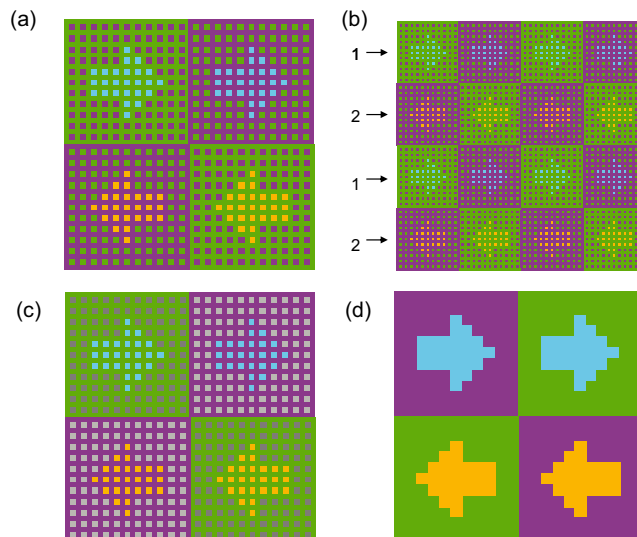


図3 (a) 色のダンジョン錯視. 4つの矢印を構成するセルがすべて違う色に見えるが、上2つの色度、下2つの色度はそれぞれ同一である. (b) (a) をさらに細かくした図. 1と2で示した行の矢印に使われているセルは同じ色である. (c) 背景のセルを灰色に塗り、同時対比効果を減じた図. (d) 格子を取り外し、同化効果を減じた図.

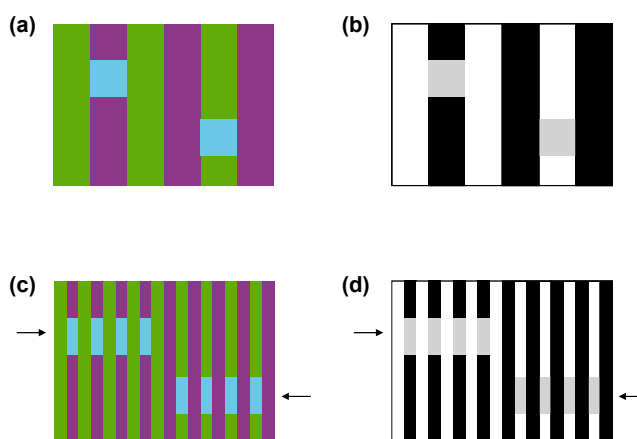


図4 (a) ムンカー錯視. (b) ホワイトの効果. いずれも、縞に挟まれた左右の四角形の色は同じだが、異なるように見える. (c), (d) は (a), (b) の縞の幅を 1/3 にした図. →で示された部分に挿入された四角形はそれぞれ色が同じだが、(a), (b) より差が顕著になっている.

明確な挙動を示す場合もあることが知られている^{28,29)}. また「色の錯視」と呼ばれる現象は、いずれも日常の現象から常識的に予測される範囲からの逸脱を伴っている. この事実、あるいは色覚に関する要素的な研究に基づく「常識」的な予測を逸脱したファンクションが、実は脳内の神経細胞にとっての「常識」であることを示唆している可能性が高い. だとすると「錯視」は、視覚の要素的な研究のための単なるガイドやデモンストレーターではなく、むしろ脳内における視覚情報のネイティブな表現型を研究する

上での主たる対象であると考えらるべきなのかもしれない。

文 献

- 1) J. von Kries: "Chromatic adaptation," in *Sources of Color Vision*, D. L. MacAdam ed. (MIT Press, Cambridge, MA, 1970). Originally published in *Festschrift der Albrecht-Ludwigs-Universität* (1902) pp. 145-148.
- 2) J. M. Speigle and D. H. Brainard: "Predicting color from gray: The relationship between achromatic adjustment and asymmetric matching," *J. Opt. Soc. Am. A*, **16** (1999) 2370-2376.
- 3) I. Kuriki, Y. Oguma and K. Uchikawa: "Dynamics of asymmetric color matching," *Opt. Rev.*, **7** (2000) 249-259.
- 4) R. W. G. Hunt: "A model of colour vision for predicting colour appearance in various viewing conditions," *Color Res. Appl.*, **12** (1987) 297-314.
- 5) Y. Nayatani: "A simple estimation method for effective adaptation coefficient," *Color Res. Appl.*, **22** (1997) 259-268.
- 6) H. Uchikawa, K. Uchikawa and R. M. Boynton: "Influence of achromatic surrounds on categorical perception of surface colors," *Vision Res.*, **29** (1989) 881-890.
- 7) R. B. Boynton and K. F. Purl: "Categorical colour perception under low-pressure sodium lighting with small amounts of added incandescent illumination," *Lighting Res. Technol.*, **21** (1989) 23-27.
- 8) 栗木一郎, 内川恵二: 瞬時色恒常性における周辺刺激と判断基準の効果, *照明学会誌*, **79**, No. 2 (1995) 39-49.
- 9) E. H. Land and J. J. McCann: "Lightness and retinex theory" *J. Opt. Soc. Am.*, **61** (1971) 1-11.
- 10) E. H. Land: "Recent advances in retinex theory and some implications for cortical computations: Color vision and the natural image," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **80** (1983) 5163-5169.
- 11) I. Kuriki and K. Uchikawa: "Adaptive shift of visual sensitivity balance under ambient illuminant change," *J. Opt. Soc. Am. A*, **15** (1998) 2263-2274.
- 12) E. H. Land: "Color vision and the natural image part II," *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **45** (1959) 636-644.
- 13) H. Helson: "Fundamental problems in color vision. I. The principle governing changes in hue, saturation, and lightness of non-selective samples in chromatic illumination," *Journal of Experimental Psychology*, **23** (1938) 439-477.
- 14) H. Helson and W. C. Michels: "The effect of chromatic adaptation on achromaticity," *J. Opt. Soc. Am.*, **38** (1948) 1025-1032.
- 15) D. B. Judd: "Hue, saturation, and lightness of surface colors with chromatic illumination," *J. Opt. Soc. Am.*, **30** (1940) 2-32.
- 16) I. Kuriki: "The loci of achromatic points in a real environment under various illuminant chromaticities," *Vision Res.*, **46** (2006) 3055-3066.
- 17) M. P. Lucassen and J. Walraven: "Quantifying color constancy: Evidence for nonlinear processing of cone-specific contrast," *Vision Res.*, **33** (1993) 739-757.
- 18) E. J. Chichilnisky and B. A. Wandell: "Seeing gray through the ON and OFF pathways," *Vis. Neurosci.*, **13** (1996) 591-596.
- 19) K.-H. Bäuml: "Increments and decrements in color constancy," *J. Opt. Soc. Am. A*, **18** (2001) 2419-2429.
- 20) R. O. Brown and D. I. A. Macleod: "Color appearance depends on the variance of surround colors," *Curr. Biol.*, **7** (1997) 844-849.
- 21) P. Bressan: "Explaining lightness illusions," *Perception*, **30** (2001) 1031-1046.
- 22) K. T. Mullen: "The contrast sensitivity of human colour vision to red-green and blue-yellow chromatic gratings," *J. Physiol.*, **359** (1985) 381-400.
- 23) J. Rivest and P. Cavanagh: "Localizing contours defined by more than one attribute," *Vision Res.*, **36** (1996) 53-66.
- 24) H. Munker: *Farbige Gitter, Abbildung auf der Netzhaut und übertragungstheoretische Beschreibung der Farbwahrnehmung* (Habilitationsschrift, Ludwig-Maximilians-Universität, München, 1970).
- 25) M. White: "A new effect on perceived lightness," *Perception*, **8** (1979) 413-416.
- 26) F. Kingdom and B. Moulden: "White's effect and assimilation," *Vision Res.*, **31** (1991) 151-159.
- 27) B. Moulden and F. Kingdom: "White's effect: a dual mechanism," *Vision Res.*, **29** (1989) 1245-1259.
- 28) K. R. Gegenfurtner, D. C. Kiper and S. B. Fenstermaker: "Processing of color, form, and motion in macaque area V2," *Vis Neurosci.*, **13** (1996) 161-172.
- 29) G. D. Horwitz, E. J. Chichilnisky and T. D. Albright: "Blue-yellow signals are enhanced by spatiotemporal luminance contrast in macaque V1," *J. Neurophysiol.*, **93** (2005) 2263-2278.

(2009年9月24日受理)