

# 色覚の多様性と色覚バリアフリーなプレゼンテーション (全3回)

## 第2回 色覚が変化すると、どのように色が見えるのか?

岡部正隆 / Masataka Okabe / maokabe@lab.nig.ac.jp

伊藤 啓 / Kei Ito / itokei@nibb.ac.jp

ホームページ

<http://www.nig.ac.jp/labs/DevGen/shikimou.html>

色覚バリアフリーマーク

このマークのデザインは

(株)武者デザインプロジェクトの武者廣平氏によるものです。



### はじめに

カラー印刷技術の発達やパソコンやインターネットの普及によって、近年我々の身近なところで、色の違いによって重要な情報を判断しなければならない機会が急激に増えてきている。学術雑誌ではカラー図版が増加し、学会においてもカラー印刷したポスターや、カラースライドや液晶プロジェクターを用いたカラフルなプレゼンテーションが一般化しており、発表者が色の違いで重要な情報を伝えようとするケースが多くなった。

色は、我々の眼が受容した光の波長別強度情報に基づいて脳で合成される感覚であり、その感覚は遺伝的背景に依存して大きな個人差がある。遺伝的背景以外にも、白内障のように水晶体が着色したり、緑内障や糖尿病性網膜症など網膜の神経細胞に障害を与える疾患においても、色覚は大きく変化することが知られている。文字や記号のような形態に基づいた情報伝達と異なり、色による情報伝達は色覚の個人差によって、相手に正確に伝わらない可能性があることに注意しなければならない。そこで本連載では、ヒトの色覚の多様性について概説し、多様な色覚に対応した「色覚バリアフリープレゼンテーション」の方法を紹介する。

第1回では「色覚の原理と色盲のメカニズム」と題して、基本的な色覚の原理、視物質遺伝子の多様性、色盲<sup>\*1</sup>が生

じるメカニズム、色盲の分子遺伝学、色覚検査などについて紹介した。第2回では、赤緑色盲や全色盲といった先天性の色覚特性、加齢や眼科疾患に伴う色覚変化(後天色盲)での色の感じ方、色の定量的な表現法、色覚のシミュレーションなどを紹介する。

### 2.1 ヒトの色覚と先天色盲について

まず簡単にヒトの色覚と色盲について復習しておく。詳細は第1回の「色覚の原理と色盲のメカニズム」を読んでいただきたい。

光は、眼球の角膜、水晶体、硝子体といった中間透光体を通して、視細胞、双極細胞、水平細胞、アマクリン細胞、神経節細胞の5種類の神経細胞から成る膜状の神経組織である網膜に到達する(図1)。光刺激を神経の活動電位に変換する視細胞のうち、全体の95%を占める杆体は暗所のみで機能し、明所では機能しない。一方残りの5%を占める錐体は、暗所では機能せず、明所のみで機能する。杆体が1種類しかないのに対し、錐体には分光吸収特性の異なるL錐体、M錐体、S錐体の3種類が存在する(以下赤錐体、緑錐体、青錐体と表記する:図2A)。暗所では光を感じる視細胞が杆体1種類だけであるため、光の強度は認識できるものの、どのような波長成分の光であるかを認識することができない。そのため我々は暗いところではモノクロームな1型色覚

\*1 「色盲」については差別的表現を避ける意図から「色覚異常」「色覚障害」「色弱」などと言い換えられることも多いが、本稿では、「異常」などの無用な価値判断を含まず、バリアフリーにおいて最も配慮が必要な重い症状までも包含している「色盲」という用語に統一する。言葉の抱える問題に関しては、本連載第1回の註\*1やホームページ<http://www.nig.ac.jp/labs/DevGen/mou.html>を参照されたい。

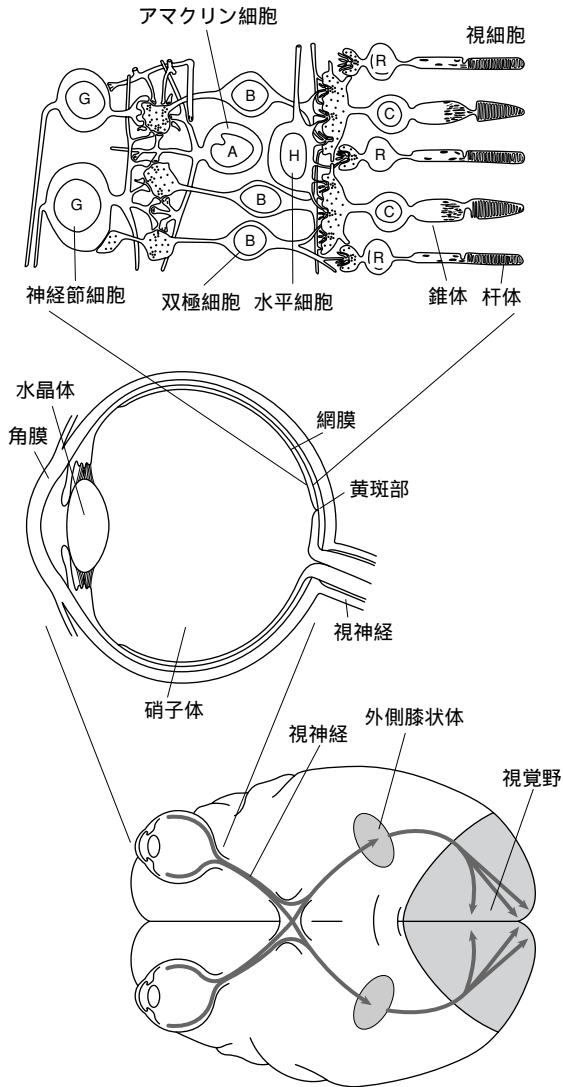
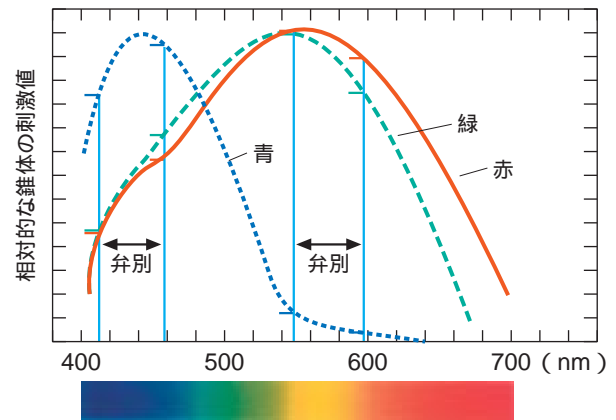


図1. 視覚系の構造

眼球に入る光は、角膜、水晶体、硝子体を通り網膜で捉えられる。網膜は、視細胞〔桿体(R)および錐体(C)〕、双極細胞(B)、水平細胞(H)、アマクリン細胞(A)、神経節細胞(G)の5種類の細胞から成る膜状の神経組織である(視細胞は光の入射方向から一番遠い側にある)神経節細胞の軸索束は視神経となり外側膝状体へ投射する。外側膝状体からは次の神経細胞が視覚情報を後頭葉の視覚野へ伝える。

となり、色を認識することができない<sup>\*2</sup>。一方明所では、眼に入った光は3種類の錐体によって波長別に3つの成分に分解される。3変数に置換された光の波長別強度情報は、網膜内のその他の神経細胞によって情報処理が行われた後、視神経を走る神経節細胞の軸索によって眼球から脳の外側膝状体に伝えられ、そこで神経細胞を乗り換えてさらに後頭葉の視覚野に伝えられ、初めて色として知覚される(図1)。こうして、明所において我々の色覚は3色型色覚となる。

A 3色型色覚



B 2色型色覚

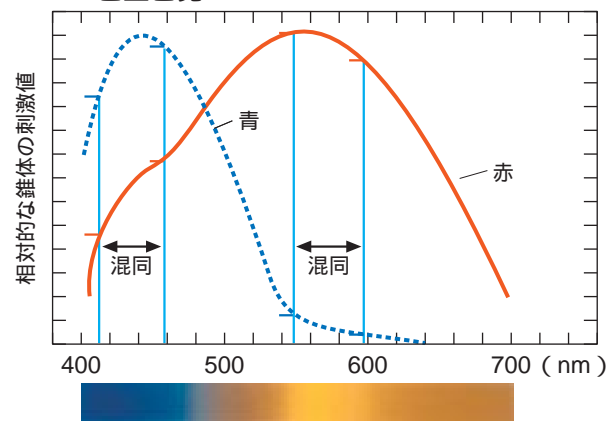


図2. 青, 緑, 赤錐体の受光スペクトルと異なった波長の色の弁別

A: 3色型色覚の3つの錐体。緑錐体と赤錐体の受光スペクトルは大きく重複している。可視光線領域の短波長側の限界と長波長側の限界を規定しているのは、それぞれ青錐体と赤錐体である。青錐体の感度は540nm程度で急速に減少するが、640nm付近まで感度を保っている。ある波長の光が眼に入射したとき、3種の錐体はその波長での分光感度に応じて反応する(赤, 緑, 青の短い横線)。3種の反応度が違えば、光は違う色として弁別される。B: 2色型色覚の例。緑錐体を欠いた眼でも、赤錐体と青錐体の反応度の差を利用して、かなりの波長の光を見分けられる。しかし反応度の比が同じようになってしまう波長は、同じような色として混同される。

遺伝子の変異によって各錐体の機能が変化すると、色覚は特徴的な先天的影響を受ける。これには、赤, 緑, 青のいずれかの視物質タンパク質(オプシン)の遺伝子が発現しなくなった場合に起きる2色型色覚(強度の色盲もしくは「いわゆる色盲」)や、オプシン遺伝子の変異によって視物質の分光吸収特性が大きく変化して、同じ光に対する錐体の活動度が大きく変化した場合に起きる異常3色型色覚(軽度の色盲, 「いわゆる色弱」)がある。図2Aで示すように緑錐体

\*2 暗くても、星や電灯などの明るい部分に対しては錐体が機能して色を認識できる。ただし明所での色の見え方と暗順応した状態での色の見え方は、若干異なる。

## A 色盲でない人



## B 第1色盲(赤錐体が機能しない)



## C 第2色盲(緑錐体が機能しない)



## D 第3色盲(青錐体が機能しない)



図3. 2色型色覚(強度の色盲)の色の見え方のシミュレーション

A: オリジナル画像, B: 第1色盲のシミュレーション, C: 第2色盲のシミュレーション, D: 第3色盲のシミュレーション. 色覚シミュレーションソフト「VisCheck」(2.7節参照)を用いて画像を変換した. 赤緑色盲である第1第2色盲はどちらも赤~緑と青~紫の領域で, 短波長側(青)と長波長側(緑, 赤)の錐体細胞の吸収極大波長付近を中心に, 対称的に見分けにくい色が存在する. さらに第1色盲では濃い赤がほとんど黒として認識される. しかし緑~青の領域では問題なく色が弁別できている. 第3色盲では逆に黄色~青に見分けにくい色が存在する.

なお, 印刷の際に生じる色の变化のため, 本記事で掲載する図版の色は実際に色盲の人や色盲でない人が感じる色と厳密にはどうしても一致しない(図18Dとp.918 \* 45参照). あくまで傾向を示す目安であることをご理解いただきたい.

と赤錐体の分光吸収特性はよく似ており, どちらの機能に影響が出て同じような表現型となるため, 赤緑色盲と総称されている. 赤オプシン遺伝子に変異が生じたものを第1色盲, 緑オプシン遺伝子に変異が生じたものを第2色盲と呼ぶ. どちらの遺伝子もX染色体に存在するため赤緑色盲は男性で頻度が高く, 日本人の多くを占める黄色人種では男性の約5%, 白人男性では約8%, 黒人男性では約4%がこれに相当する(日本人男性に約300万人). また日本人女性でも0.2%(約12万人)が赤緑色盲であり, その保因者は女性10人に1人の割合で存在する. 白人では女性の0.5%が赤緑色盲である. 常染色体に存在する青オプシン遺伝子の変異は第3色盲もしくは青黄色盲と呼ばれ, 数万人に1人ときわめて少ない.

## 2.2 赤緑色盲の人にはどのように色が見えるのか

まず, 最も頻度の高い赤緑色盲の色覚について考えてみよう. 本節では, 色盲としては程度が重い2色型色覚(強度の第1色盲と第2色盲)の色覚を中心に説明する. 2色型色覚は, 赤緑色盲全体の1/3 ~ 1/4を占める<sup>\*3</sup>. 数の上では多数派である異常3色型色覚(軽度の第1色盲と第2色盲, いわゆる色弱)では, 色の見え方はここで説明する2色型色覚と正常3色型色覚の間になる. また, ここで示すシミュレーション画像もすべて2色型色覚のものであり, 異常3色型色覚ではこれらとオリジナル画像(正常3色型色覚)との中間になる. 赤か緑のオプシンの機能を完全に欠いている2色型色覚では色の見え方は比較的個人差が少ないが, 異常3色型色覚では第1回1.5節に述べたようにオプシン遺伝子のエクソンの組み合わせによって様々な種類があり, 色の見え方は非常に多様で個人差が大きい. 人によっては2色型色覚に近い場合もあれば, 色盲でない人とほとんど変わらない場合もある<sup>\*4</sup>.

A: 赤~緑と青~紫にかけての色の弁別が困難だが, 緑~青にかけての弁別には支障がない

それぞれの錐体細胞は, 視物質の吸収極大波長付近の光に対しては強く, それから離れた波長の光に対しては弱く興奮する. 大多数の哺乳類がそうであるように, 青に吸収極大波長を持つ短波長側錐体細胞と緑もしくは黄緑に吸収極大波長を持つ長波長側錐体細胞の2種類があれば, 2つの細胞の出力の差を検出することで広い波長範囲の色を弁別することができる<sup>\*5</sup>(図2B). これが2色型色覚である. 強度の第1もしくは第2色盲では赤錐体(黄緑に吸収極大)か緑錐体(緑に吸収極大)の機能が失われるので, 残る青錐体と組み合わせた2色型色覚となる. スペクトルのシミュレーション(図2Bと図3)を見ると, 第1色盲でも第2色盲でも緑から青の範囲の色は, 色盲でない人と同様に微妙な色が弁別できることがわかる. しかし2種類の錐体細胞の出力が同じような比になる波長は, 図2Bに示すようにどちらの錐体細胞においても吸収極大波長の長波長側と短波長側に1つつずつ存在しうる. これらの波長の光は錐体からの出力が

\*3 赤緑色盲の種類(第1と第2)と程度(2色型:色盲と異常3色型:色弱)は眼科の精密検診をしないと判定できないが, 眼科まで検診を受けに来る人の比率は症状が重い人に偏っている可能性があり, またアノマロスコープ診断には同一被験者でも検査する人によって2色型に判定されたり強度の異常3色型に判定されたりするという限界があるため, 種類や程度の正確な比率はわからない. 日本では小学4年生の児童32958名を調べた結果, 第1色盲, 第1色弱, 第2色盲, 第2色弱がそれぞれ0.4%, 0.7%, 1.4%, 3.2%(合計5.7%)という報告がある<sup>1)</sup>. アメリカでは人口比でそれぞれ1%, 1%, 1%, 5%(合計8%)と言われている.

\*4 著者のホームページを見た色盲(色弱)の方から, 色の見え方の説明やシミュレーション画像について「自分にはこんなに色が違って見えるわけでは全然ない. このような極端な例を出されて, 色盲の人が皆このような色を見ていると思われるのは心外であるし, 不要な差別の原因にもなりかねない」とのご批判をときどき頂戴している. 本稿は色覚バリアフリーを進める立場から, 最も強度の色盲の人を例にとりて色の見え方を説明し, それに対応したバリアフリーなプレゼンテーションが普及できれば, 他のすべての人にも見やすさが保証できるはずだという立場をとっている. 趣旨をご理解いただければ幸いである.

\*5 イヌやネコには色覚がないという言説をよく耳にするが, 錐体細胞の種類から見る限り, ほとんどの哺乳類は赤緑色盲の人と同程度の色彩認識能力を持ちうる. 実際に心理物理学的実験によって, 多くの哺乳類が2色型色覚を持っており, モノクロームな1色型色覚ではないことが示されている.



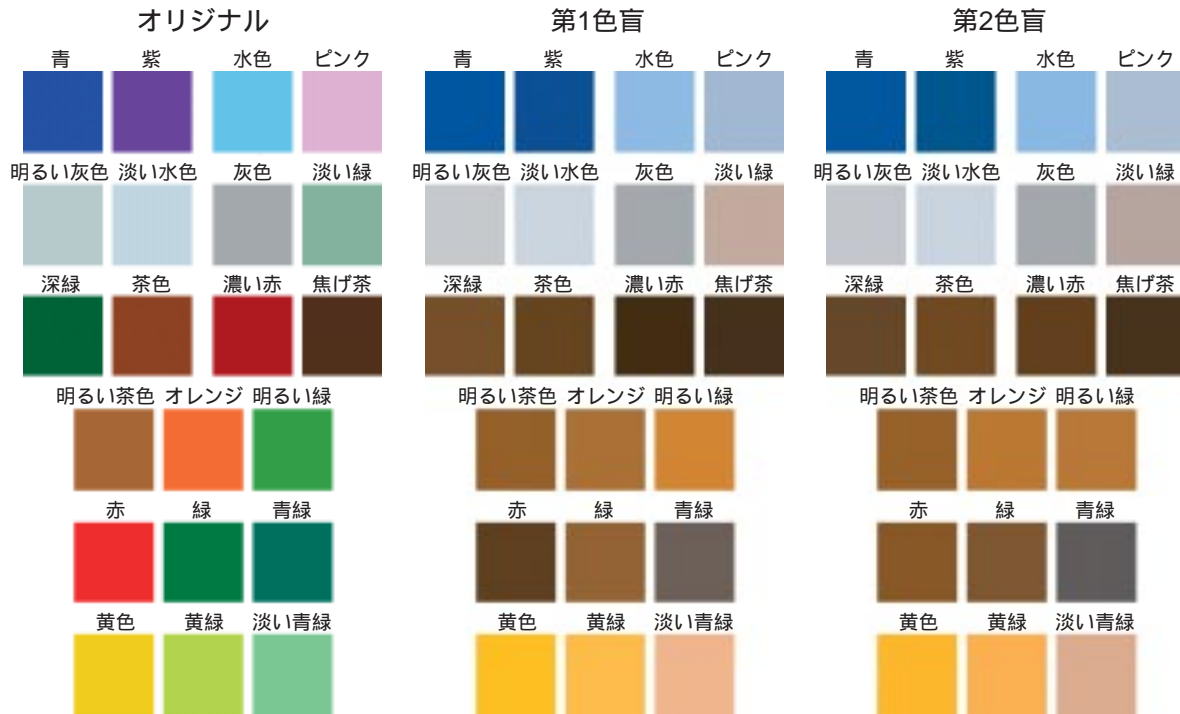


図4. 赤緑色盲における混同色 「色の弁別」と「色の同定」

左列：オリジナル画像，中列：第1色盲のシミュレーション，右列：第2色盲のシミュレーション。1～3行目と4行目：赤緑色盲の人が混同しやすい2色と3色の組み合わせ。シミュレーションによって色の差が小さくなっているのがわかる。5,6行目：小さな色の差で赤緑色盲の人に見分けやすくなる例。暖色系の緑や黄緑は赤や黄色と混同しやすいが(左の2枚)，青みの強い緑は混同しにくい(右の1枚)。シミュレーションの3,4,5行目：「色の弁別」は，色相や明度，彩度のわずかな違いがあれば可能であるが，これらの色について色名を尋ねられても「茶色？」としか答えようがない。色のカテゴリーの境界は3色型色覚の人の感覚に合わせて定められており，色盲の人にとってこれらの色を，赤，オレンジ，緑，茶色，黄色，黄緑などのカテゴリーに分類する「色の同定」はきわめて困難である。

同じであるため，脳には同じような色として認識されてしまう。スペクトルのシミュレーションで，長波長側視物質の吸収極大波長である531nm(緑)～558nm(黄緑)付近を中心として左右の色が対称的に見えてしまっているのは，この理由からである。また短波長側視物質の吸収極大波長419nmを挟んだ青から紫にかけての範囲でも，左右の色が対称的に見えてしまっている。

3色型色覚の人では，さらにもう1種類の錐体細胞からの出力を利用することで，このような2色型色覚では混同してしまう色も弁別できる。青錐体と赤錐体の出力の比が同じになるような波長の組み合わせでも，緑の錐体細胞の出力は異なった値になる(図2A)。3色型色覚の人はこのようにして赤から紫にかけての広い範囲の波長の光を混同なく弁別することができるようになっていたのに対し，赤緑色盲の人はスペクトルの両端部で，色の弁別能が落ちるわけである。

#### B：赤緑色盲で混同しやすい色

このような色覚特性を持つ赤緑色盲では，実際にどのような色が弁別しにくくなるのだろうか？

まず前述したように，スペクトルの上に並ぶ色では赤～

緑と青～紫で，明度が類似した色の見分けが困難になる(図2,3)。長波長側の錐体の吸収極大波長である緑～黄緑をおおよそ中心として左右対称に，「黄色と黄緑」「赤と緑」などが見分けにくくなる。また短波長側では，青と紫の弁別がつかない。

人間はスペクトルの上に並ばない多くの色も認識できる。このような色では，ある色と，それに緑みや黄色みや赤みを足した色とが弁別しにくくなる。「緑と茶色」「濃い赤とこげ茶色」「明るい茶色とオレンジと黄緑色」などである(図4)。「水色とピンク」「灰色と淡い水色や薄緑」「芝生の色，夕陽の色，ライオンの色」など彩度(色飽和度)の低い色では，さらに弁別が難しくなる(図4)。衣類や装飾，ファンシーなデザインによく用いられるパステルカラーやアースカラーは彩度の低い色であり，薄暗い場所では特に色の弁別が困難なことが多い。白や水色のシャツと薄いピンク色のシャツの区別に困難を感じたり，薄暗い飲食店のトイレの男女別が水色とピンク色の同じ形の標識で示されていて，この2色が弁別できなかつたりすることがある<sup>\*6</sup>。強度色盲の著者は，そっと中を覗き小便器の存在を確認してから入った

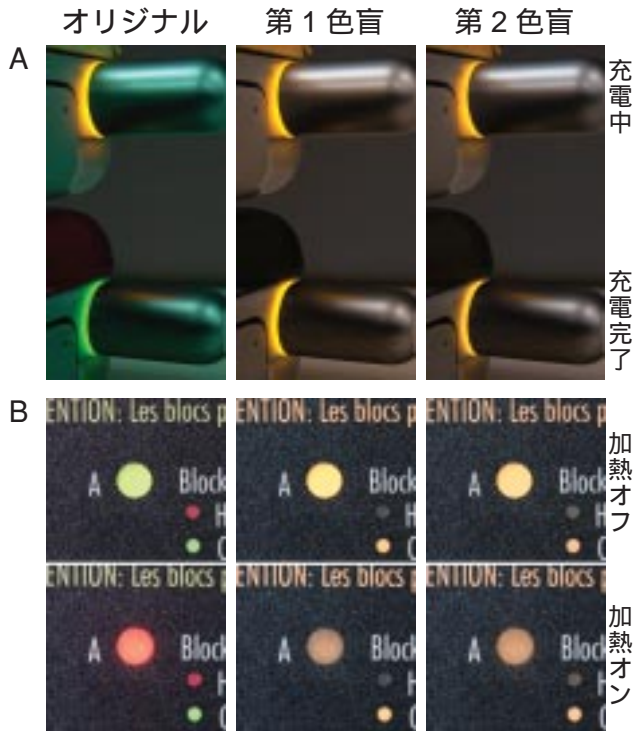


図5. 弁別困難な、赤/緑、オレンジ/緑の2色発光ダイオード  
左列: オリジナル画像, 中列: 第1色盲のシミュレーション, 右列: 第2色盲のシミュレーション. A: ノート型パソコンの電源アダプターのパイロットランプ. 上段のパソコンは充電中でオレンジの発光ダイオード(LED)が点灯している. 下段のパソコンは充電が完了し緑のLEDが点灯している. B: PCRのパイロットランプ. 上段: 加熱ヒーターがオフの状態緑のLEDが点灯, 下段: 加熱ヒーターがオンで赤のLEDが点灯. 第1第2色盲の人にはランプの色の区別が困難なことがわかる.

経験がある. 端から見れば実に怪しい行為である.

我々の周りには, 赤と緑を弁別できることを前提とした表示や掲示が多く見受けられる. 先日利用したスキー場のゲレンデ案内板は, 初心者コースが緑色の実線, 上級者コースが赤色の実線で描かれていた. 色盲の人にはどれが初心者用がよくわからない. 案内板を頼りに麓のゲレンデからは見えない山頂付近のコースへゴンドラで昇ったところ, そこは急斜面の上級者コースで, 初心者にはとても滑って降りられる状態ではなかった. スキーを外して歩いて降りることで難を逃れはしたが, ゲレンデの混雑状態や天候によっては非常に危険なことである.

図5Aは電源アダプターのパイロットランプである. 充電中はオレンジの発光ダイオード(LED)が点灯し, 充電が完了すると緑に切り替わる. また図5BはPCRのパイロットランプで, 緑がヒーターの加熱オフ, 赤がオンである. これら

は1つのランプで2色の表示を行うので, 色の弁別ができなければ2つの状態を区別することができない. しかしシミュレーションでは第1第2色盲とも, ランプの色を弁別できないことがわかる. 同じような赤と緑や, オレンジと緑のLEDは, 家庭用や実験用の電気製品で無数に使われている. これらは色盲の人にはメッセージがほとんど伝わらない. エラーであることに気が付かず機械を破損したり, なぜ作動しないのかわからず不要な修理を頼むことになったりして, 不必要な出費や時間の無駄となる.

駅で電車の行き先や発車時間を表示する電光掲示板などでも, 緑と赤の2色LEDが多く用いられている. この色の差も, 赤緑色盲の人にはほとんど認識できない. 単色の表示に見えるだけである.

一方で, 同じ赤と緑の光の組合せでも交通信号機は, 赤緑色盲の人でもきちんと赤と緑(青信号)を区別できるようになっている. 電気製品の緑のLEDに比較して, 交通信号機では青錐体を刺激する, より短波長側の(寒色系の)緑を使用することが国際照明委員会で厳密に定められ, 日本でも「JIS安全色光使用通則」によって規定されている. 赤と緑のLED表示も, 緑にこのような短波長側の緑色を使えば色盲の人にも理解しやすくなるはずである. もっとも, 赤と緑でなく青色LEDや白色LEDを赤や緑と組み合わせるほうが, 違いをわかりやすくするためにははるかに効果的である. C: 直接比較できない色の見分けが難しい

色が左右に2つ並んでいて同時に見比べられる場合に比べ, 2つの色を時間をおいて交互に見比べる場合, 色盲でない人でも色の弁別能力は大きく低下する. この影響は色盲の人の場合特に大きい. 図5のようなパイロットランプは, 2つの色が同時に表示されていれば微妙な差を感じることも不可能ではないが, 片方の色しか見ることができないため, 見分けるのは特に困難になる.

D: 小さな図形, 細い線ほど, 色の判別が難しい.

色の弁別能力の低下は, より多くの錐体細胞からの情報を集めることで, ある程度補うことができる. したがって, 広い面積に塗られた色は比較的容易に認識することができるのに対し, 小さな点や細い図形の色は見落としやすい. 例えば, 間近で見るスポーツカーが赤い色であることは容易に気付くが, 緑の葉の中にちらほら赤い葉がある紅葉にはなかなか気付かない. またマジックのように太く書かれた赤線の色はわかるが, ボールペンで書かれた細い赤線は黒と見分けがつかない(図6B). 打ち上げ花火や夜空の星の色は, それぞれの光が点状で面積が小さいため色を弁別する

\*6 男は青, 女は赤というような色の割り当ては, 万国共通とは限らない. 色に与えられたイメージだけを利用したこのような表示は, 色覚の問題以外にもその人の文化背景によって異なる解釈をする可能性が高く推奨できない. 2色発光ダイオード(LED)のパイロットランプ(図5)も, 赤をオン, 緑をオフに使っている機械と緑をオン, 赤をオフに使っている機械が乱立しており, 情報伝達のツールとして機能していない.

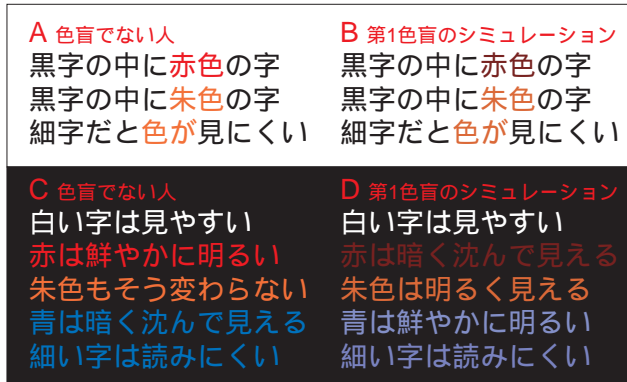


図6. 同じ色が、どの人にとっても見やすいとは限らない

A, C: オリジナル画像. B, D: 第1色盲のシミュレーション.  
明るい背景における黒の文字列の中の赤字は強調されて見えるが(A), この赤が長波長の「濃い赤」であると第1色盲の人にはほとんど黒に見えて、強調されて見えない(B). また暗い背景だと文字を読むことすらできなくなってしまう(D). 短波長よりの「朱色」や白を混ぜた「明るい赤」を用いると、字が読めるようになり(D), 黒字と区別できるようになる(B). 赤緑色盲の人には青は明るく目に飛び込んでくる傾向にあるが(D), 赤緑色盲でない人には暗く沈んで見える(C). 色面積が大きいほど色を弁別しやすいため、文字に色を載せるときは線の太い書体を選ぶとよい(B, D).

のが難しい. 花火の色なら実生活で困ることはあまりないが、学校の地学の授業で扱う星の色は、色盲の人には色の違いを実感しにくく、「さそり座のアンタレスは赤色」のように頭で覚えるしかない.

E: 第1色盲では赤が暗く見える

赤緑色盲の色覚の特徴でもう1つ忘れてはならないのは、第1色盲では可視光領域が長波長側で狭くなっていることである. 黄緑に吸収極大波長を持つ赤視物質は長波長の赤まで感度があるが、緑に吸収極大波長を持つ緑視物質は長波長の赤を光として捕らえることができない(図2A). 知覚的な比視感度曲線を見ると、色盲でない人や第2, 第3色盲の人と異なり、第1色盲では赤の感度が非常に低い(図7). この人たちにとって、赤は明るい鮮やかな色ではなく、暗い地味な色である. 図3Bの第1色盲のシミュレーション画像を見ると、赤のところでは急激に暗くなっていることがわかる. そのため長波長の「濃い赤」(R, G, B=100%, 0%, 0%)はほとんど「黒」に見える.

白地に黒い文字列の中で、強調したい文字を赤字にすることはごく普通に行われているが、濃い赤を用いると第1色盲の人には黒文字とほとんど区別がつかず、まったく強調されて見えない(図6B)<sup>\*7</sup>. 白地であれば文字が読めるだ

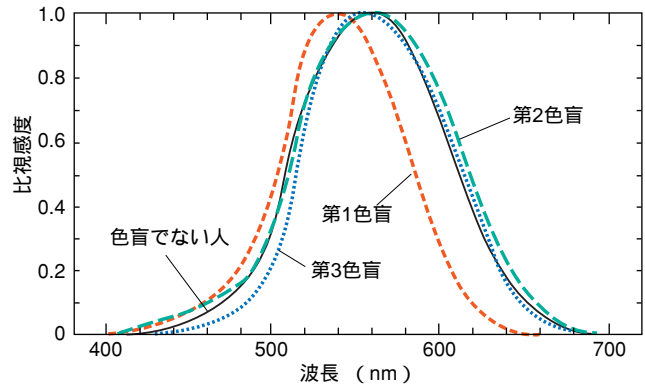


図7. 色盲の人の比視感度

各6~7名の被験者に色光を見せて感じる明るさを測定した値の平均値. 赤錐体を欠く第1色盲では長波長(赤)側の感度が著しく低い反面、黄緑より短波長(青)側の感度は高い. 第2色盲は長波長側は色盲でない人と変わらないが、480nmの青より短波長側では第1色盲同様に感度が高い. 青錐体を欠く第3色盲では短波長側の感度が低い.  
池田光男: 色彩工学の基礎(朝倉書店): 1980, 図9.2より改変.

けまだましであるが、PowerPointやカラースライドで黒や紺、濃い青色の背景に「濃い赤」の文字があると、文字が目立たないどころか読むことさえできない(図6D). 「濃い赤」を使わずに、少しだけ白を混ぜた「明るい赤」(R, G, B = 100%, 20%, 20%)や短波長(オレンジ)寄りの「朱色」(R, G, B = 100%, 20%, 0%)を使うと、同じ赤でも緑視物質や青視物質を刺激することが可能となり、黒い文字列の中でも強調され、暗い背景の中でも文字が読めるようになる(図6B, D).

同じ理由で第1色盲の人には、交通信号の赤信号の光は黄色信号の光より、暗く沈んで見える. 学会でスライドを指し示すのによく使われる赤いレーザーポインターも非常に見にくい. 赤色LEDを用いた電光掲示板の文字も読みにくい. 電光掲示板の赤と緑の文字は、第2色盲の人にはほとんど同じ色に見えるが、第1色盲の人にはほぼ同系色で赤だけが暗く沈んで見える. たいいていの場合、重要な情報が赤で表示されているので、重要な情報ほど読み取りにくいということになる<sup>\*8</sup>.

このように赤視物質の変異による第1色盲では赤い光が見にくくなることがあるが、緑視物質の変異による第2色盲で緑色の光が見にくくなることはない. 赤視物質の吸収極大波長は実際には黄緑にあるので、緑視物質がなくても赤視物質で緑色の光を受容することが十分に可能だからである(図2A).

\*7 各駅停車を黒文字、特急や急行を赤文字で表示した駅の時刻表は、よく眼を凝らさないと黒一色にしか見えない. また第2色盲の人には、赤は見えても準急や快速の緑文字との区別ができない.

\*8 このLEDが赤でなく少しだけ短波長(オレンジ)寄りの「朱色」であれば、第1色盲の人にも十分に明るく見えるはずである.



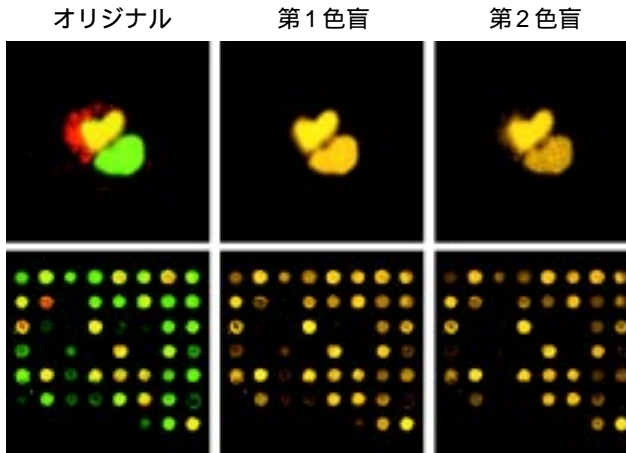


図8. 赤と緑で掲示した蛍光二重染色画像とDNAチップ画像のシミュレーション

上段:共焦点レーザー顕微鏡による二重染色画像,下段: DNAチップ画像.左列:オリジナル画像,中列:第1色盲のシミュレーション,右列:第2色盲のシミュレーション.どちらの画像でも赤と緑が重なったところは黄色になる.第1第2色盲ではどちらも緑と黄色の部分の区別ができない.さらに第1色盲では赤の部分も暗く見える.

F:生物の学術図版に頻出する,赤緑色盲の人に見わけにくい色の組み合わせ

以上のように赤と緑は,赤緑色盲の人には弁別が難しい色である.しかし生物学の分野では,蛍光顕微鏡の二重染色写真やDNAチップの画像など,蛍光色素の発色の都合から赤と緑を組み合わせた画像が非常に多い(図8).FITC,アレクサ488,GFPなどの蛍光色素やテレビモニターの緑蛍光体が発する明るい緑の光と,ローダミン,Cy3,DsRedや

テレビモニターの赤蛍光体が発する明るい赤の光は,単独なら赤緑色盲の人にも弁別できる.しかし2色が重なった場合,緑に赤を加えた黄色が,緑とほとんど見分けがつかない(図8).緑と黄色が弁別できないと,赤が緑に重なっている部分では,赤の領域がどこまで広がっているかもわからない.さらに第1色盲の人には,赤の部分は暗くて見えにくい(前節)\*9.顕微鏡画像では広い部分が一樣に同じ色である場合は少なく,ごく小さな点や細い線状の部分の色の違いを見分ける必要があるので,困難は特に大きい(2.2節D).赤と緑の蛍光二重染色の画像を理解するのは,赤緑色盲の人には至難の業なのである.

G:同じ色名のカテゴリーに分類される色でも,見分けやすい色と見分けにくい色がある.

色名とは,ある範囲の色あいをもとめて1つのカテゴリーに分類したものに付けられた名前である.当然同じ色名であっても,その中には様々な微妙な色あいを含む.そのうちの一部は色盲の人にも見分けやすく,一部は見分けにくいことがある.

たとえば緑は,黄色みがかった暖色系の緑から青みがかった寒色系の緑まで,様々な色あいがある.この中で暖色系の濃い緑は,色盲の人には茶色とほとんど見分けがつかない(図4).鮮やかな緑である抹茶色は,色盲の人には真っ茶色に見えることがあるし(図9A),日本の夏の広葉樹林の深い緑も,茶色と見分けがつかない.一方道路標識の緑のように青みが強い緑は,茶色と間違えにくい(図4,9B).また明るい緑は,暖色系だと黄色や赤と間違えることがあるが,青みが強ければ間違えにくい(図4)\*10.道路標識や交通信号

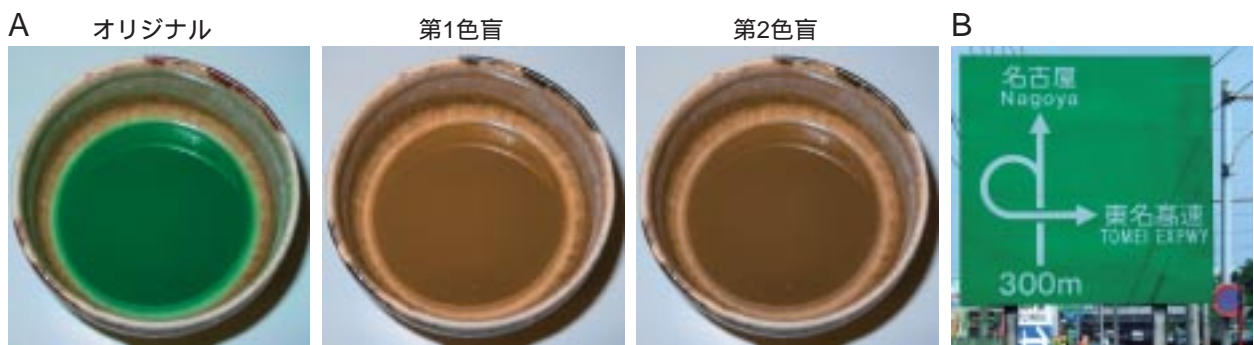


図9. 抹茶色は真っ茶色

A:抹茶のような暖色系の緑は,いくら鮮やかでも赤緑色盲の人には茶色と区別がつかない.なお日本語の「茶色」は,お茶の木を煮出し,布に染めたときの色から来ている.B:同じ緑でも青みの強い寒色系の緑は,赤緑色盲の人でも茶色とは間違えにくい.

\*9 強度第1色盲の著者は,学生時代に初めてローダミンを用いた蛍光抗体染色をしたとき,強く染色されなかったと思ってやり直した.しかしこれは染色が失敗したのではなく,自分の色覚特性によって染色されたサンプルが暗く見えたことが原因であった.多くの色盲の人は,普段自分が色盲であることを特別意識していない.実験行程の長い抗体染色では,どこで失敗したのかを明らかにするのに時間がかかることがあるが,このようなことも失敗の原因となりえることを指導者は知っておくとよい.

\*10 緑という名前でイメージする色は,おそらくその国の自然で左右される.北ヨーロッパのアイランドのシンボルカラーや,オランダやドイツでよく見かける緑色は,青みが強く茶色とは間違えにくい.一方南国であるイタリアやスペインでよく見かける緑色は,日本と同様に暖色系で,赤や茶色と間違えやすい(図11参照).

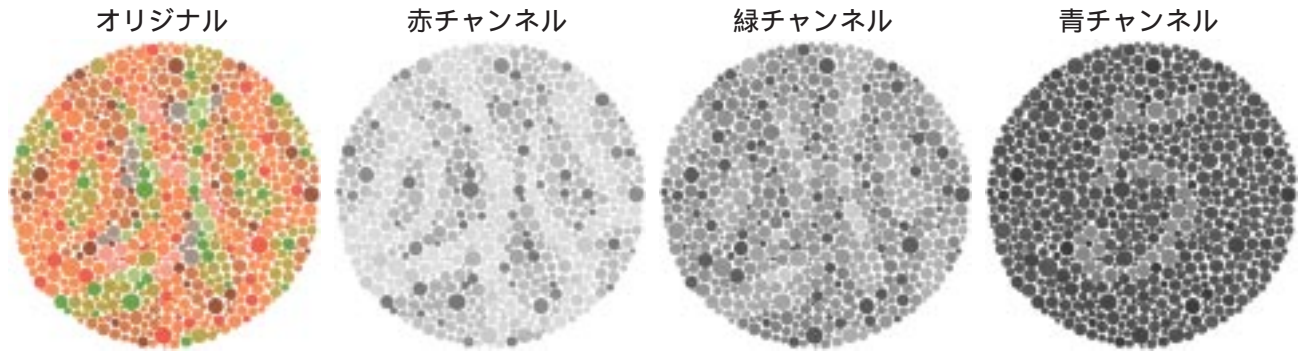


図 10. 色盲の人にしか読めない石原表のトリック

赤緑色盲の人には「5」と読めるが色盲でない人には読めない石原表: この表を赤, 緑, 青の各チャンネルに分解してみると, 青チャンネルに隠されている「5」の字を見出すことができる. この表は, 赤緑色盲の人が色盲でない人よりも青系統の色に対する感度が高いことを巧みに利用している. 図は, 財団法人 一新会より許可を得て, 石原総合色盲検査表〔(株)はんだや〕から転載. ただし複製のため印刷の色調は多少異なる. 検査表の色の特性, 配色は非常に微妙なため, 厳密な色管理がされた正式な検査表以外は色覚の判定には使えないので注意されたい.

は, 同じ緑でも青みの強い色に限ることが定められている.

またEで触れたように, 第1色盲の人には濃い赤は非常に暗く見えるが, それより僅かに短波長(オレンジ)寄りの朱色は十分明るく鮮やかに見える(図6B, D). しかし色盲でない人には, この2色の差はごく僅かにしか感じられない(図6A, C).

このように同じ色名で表わされる色でも, 僅かな色調の違いが色盲の人への見やすさを大きく左右することがある. 「赤緑」色盲という名前から「赤と緑の違いがまったく分からない」と想像される人も多いが, 赤や緑の中にも違いがわかりにくい色とわかりやすい色がある. このこと自体, 色感覚と色名の対応の難しさや, 色名による情報伝達の難しさを表しているとも言える.

H: 青色への感度はむしろ高い面がある

色盲の人は色への感度がおしなべて低いというわけではなく, 色によってはむしろ高い場合もある. 黒い背景に赤と青で文字を書いた場合, 色盲でない人には赤色が明るく目に飛び込み, 青が沈んで見える傾向があるが, 色盲の人には第1色盲第2色盲に関わらず, 逆に赤が沈み, 青色が明るく目に飛び込んでくる傾向がある(図6C, D). 視感度曲線を見ても, 第1第2色盲とも480nm以下の青色光に対する感度が高い(図7).

赤緑色盲の人は, 単に青が明るく見えるだけでなく, 青の微妙な差を色盲でない人よりも高感度に検知できる. 図10は石原色覚検査表(石原表)の1つで, 色盲でない人には何も読めないが赤緑色盲の人には「5」と読める. この表を赤, 緑, 青の3つのチャンネルに分解すると, 青チャンネルだけに明らかな「5」の数字が描かれていることがわかる. 色盲の人には容易にわかるこの青色強度の差に, 色盲でない人は気付くことができない. 色盲の人と色盲でない人の色覚

は, 単純な優劣では測れないことがわかる.

I: 明度や彩度の差にはむしろ敏感である

「色」には大きく分けて, 色相, 明度, 彩度の3つの要素がある. このうち錐体細胞が3種でなく2種になることで影響を受けるのは, 色相に関する判断だけである. 物体の明るさを示す明度や, 色の純度(飽和度)を示す彩度には影響が少ない. 色盲の人は色相の判断が苦手なぶんだけ, 明度や彩度にはむしろ敏感な傾向がある. したがって, 異なる色あいの弁別が苦手でも, 同系色の明暗の弁別には支障は少ない. たとえば地図の段彩でよく見られる, 同じ明るさで色相が異なる緑, 黄緑, 黄色の塗り分けは区別が非常に難しいが, 同じ色相で明るさが異なる暗い緑, 緑, 明るい緑の塗り分けなら容易に区別できる. LEDのように単色の強い光を出すものは明度, 彩度とも常に最大で, 差がほとんどない. したがって色相だけで色の違いを判断しないとならず, 非常に見分けにくくなる.

J: 自分の眼で区別できないところに色分けがあるとは考えない傾向がある

赤緑色盲の人は一部の色の組み合わせを除き, 大半の色を実用上問題なく弁別でき, 眼にはカラフルな画像が映っている. そのため自分の眼に区別できないところに, さらに色分けがあるとは考えない傾向がある. その結果として, 塗り分けがされていることに気付かないことがある.

逆に目の前の色が一見1つの色に見えていても, 会話の文脈などから「3色型色覚の人から見れば複数の色から構成されているらしい」と意識できる場合には, 色相だけでなく明度や彩度の微妙な差を感じ取ることによって複数の色を確認できることが多い. 場合によっては「自分には見分けられない色がある」という意識が先走り, 実際には1色でしかない対象に「複数の色があるに違いない」と考えることもあ





図 11. 赤緑色盲の人の不安 「2色に見えるけれど、もしかすると3色なのかもしれない」

左から順に、ナイジェリア、イタリア、アイルランドの各国旗。同じに見える色が世間では区別されているという事態に度々遭遇していると、2色に見えるナイジェリアの国旗も、もしかすると3色なのかもしれないという不安が生じてくる。なお、アイルランド国旗の青みの強い緑は同国政府の書類で正式に色あいが決められているが、「世界の国旗」の類の多くの書籍やホームページでは、同国の国旗もイタリア国旗と同じ青みのない緑で塗られてしまっていることが多い。色盲でない人の多くは、このように違う色を同じ「緑」のカテゴリーに入れて同一視してしまう。赤緑色盲の人は黄色と黄緑は同一視しても、このような2色は同一視しにくい。色覚によって色のカテゴリー分けの境界が異なっていることがわかる。

る。白と緑の2色から成るナイジェリアの旗を見て「自分には2色に見えるが、イタリアやアイルランドの旗のように左右の色が異なった3色なのかもしれない」と不安に思うわけである(図11)。

K: 色名を用いたコミュニケーションが非常に困難である

おそらく色盲の人が日常最も困難を感じているのは、色を見分けることよりも、眼で見た色の名前を口に出して言うことと、耳から聞いた色名に対応するものを対象の中から選ぶことである。色と色名を結び付ける作業(色の同定)は、色の違いを知覚する(色の弁別)のとはまったく異なった課題である。色の弁別には2つの色の色相や明度、彩度のわずかな違いがわかればよい。一方、色の同定は、眼から入る色情報を頭に記憶してある色のカテゴリーと対照し、一定の対応を付けるわけである。1つの色名は、明度や彩度が大きく異なる様々な色を包括している。色名は動物に本来備わる生得的な感覚ではなく、文化によって定義されたものであり<sup>\*11</sup>、色のカテゴリーの境界は社会の構成員の過半を占める正常3色型色覚の人の感覚に合わせて定められている。色盲の人にとっては、この境界に従って色をカテゴリー化することがきわめて難しい。図4の3～5行目には赤、オレンジ、緑、茶などの色が並んでいるが、色盲のシミュレーションではこれらの色はほとんどが茶色になっている。たとえ明度や彩度を利用してそれぞれの色の「弁別」はできても、それを赤、オレンジ、緑、茶のカテゴリーに分類する色の「同定」はきわめて難しい(図11)。

同様に、カラフルな鳥や熱帯魚を見るときや、壁紙やカーペットの見本帳を見るときなど、いろいろな色が眼に映っているが、それぞれを何色と呼んでいいかはよくわからな

いという状況は、色盲の人にはごく日常的である。たとえば赤、橙、黄、黄緑、緑、茶色、青、ピンク、紫の風船を色別に仕分けることには何の問題もない。しかし風船が何色かを答えたり、色名を言われてその色の風船を選ぶような課題は、色盲の人には非常に難しい。風船を欲しがると子供に「なに色の風船が欲しい?」と聞かずに「どの風船が欲しい?」と場所で答えさせるよう質問を誘導するなど、色名を使ってコミュニケーションする状況になるべく陥らないよう会話の流れを工夫するのは、色盲の人に共通した生きるための知恵である。

コンピューターのグラフィックソフトでは、文字や図形の色をカラーパレットから選べるようになっている。色盲でない人は一目見て赤や緑や茶色を選ぶことができるが、これは色盲の人には至難である。似た色が上下左右に並んだパレットから同じ色を間違えずに毎回選ぶためには、「左から3列目の上から4番目」のように位置で覚えておく必要がある<sup>\*12</sup>。また黄色のつもりで黄緑を選んだりしないよう、選んだ色のRGB値やCMYK値(後述)を常に意識する。慣れた人はカラーパレットを一切使わず、直接RGB値やCMYK値を調整して、どのような色になるかを頭で考えて指定することも多い。これらの工夫によって色盲でない人から見ても違和感のない色を選ぶことができるが、色盲でない人と色の選び方について話すと、色を数値でなく感覚で捉えていることに驚かされることもある。

### 2.3 青黄色盲の人にはどのように色が見えるのか

連載第1回を含めて青黄色盲(第3色盲)にはほとんど触れていないので、まず第3色盲の生じるメカニズムについて

\*11 文化によって、色の領域の分け方は微妙に異なり、それはその文化で重要な関心が持たれている色の領域や、入手可能な絵具や染料の違いにも影響される。日本の岩絵具とヨーロッパの油絵具では色の分け方が大きく異なる。白一色のエスキモーの世界では白を表わすのに非常に多くの色名がある。日本語で「紫」という語が含む色の範囲にちょうど相当する単語は英語にはなく、赤みがかった purple, magenta や青みがかった violet に分かれてしまう。

\*12 「Macromedia FreeHand」のようにカラーパレットに色のパッチだけでなく色名やRGB, CMYK値が直接表示されるグラフィックソフトが非常に使いやすい(「Adobe Illustrator」もカラースウォッチの「リスト表示」を選択すればある程度使いやすい)。

説明する第3色盲で変異を生じている青オプシン遺伝子は第7染色体に存在するため、遺伝形式は常染色体劣性である。赤緑色盲が隣接する赤オプシン遺伝子と緑オプシン遺伝子の間の不等交叉による相同組換えによって高頻度に生じるのに対して、青オプシン遺伝子は単独で存在するため変異の生じる頻度も低く、第3色盲の頻度は数万人に1人(約0.002~0.007%)と稀であると言われている\*13。

吸収スペクトルに重複が大きい赤と緑の視物質に比べ、1つだけ離れたスペクトルを持つ青視物質が失われた場合(図2A),原理的には見えなくなる色の範囲ははるかに大きいはずで、重大な症状が起きそうに見える。しかし、色盲でない人は3つの視物質のうち赤と緑からの情報を重点的に色の弁別に利用し、青からの情報の利用度は相対的に低くなっている。そのためスペクトルのシミュレーション(図3)でも明らかのように、3種類の色盲の中では第3色盲の人の色の感じ方が、色盲でない人にいちばん近いと言える\*14。第1色盲における長波長域の赤と同様に、第3色盲における短波長域の青はその人の可視光線領域の外にあるため黒として認識され、そのため濃い青と黒を弁別できない(図3,7)。また赤と緑の光を混合した黄色は白と弁別できない。

3色型色覚の人が青錐体の情報を補助的にしか使っていないこともあり、第3色盲では他人から色覚の差を指摘されることも少なく、自覚症状も少ないと考えられ、自ら眼科を受診するケースはきわめて稀である。眼科で第3色盲様の色覚変化を指摘されるのは、他の眼科症状を訴えて受診した人がほとんどであり、これは後述する後天色盲に相当する。そのためほとんどの青黄色盲用の検査器具は、頻度の少ない先天色盲でなく後天色盲の検査用に準備されている。

## 2.4 全色盲の人にはどのように色が見えるのか

「いわゆる全色盲」とは1色型色覚(monochromats)のことを意味しており、2つの原因が考えられる。1つは2種類の錐体視物質が失われ、1種類の錐体だけが存在する錐体1色型色覚であり、もう1つはすべての錐体視物質もしくはすべての錐体機能が失われ、杆体のみで光を感受する杆体1色型色覚である。

錐体1色型色覚は任意の2種類のオプシン遺伝子に変異が

生じれば成立する。赤オプシン遺伝子もしくは緑オプシン遺伝子のどちらかが発現しなくなった赤緑色盲と、青オプシン遺伝子の変異とが同時に生じる可能性はきわめて低く、錐体1色型色覚は事実上は赤オプシン遺伝子と緑オプシン遺伝子の両方が発現しなくなる例に限られる。X染色体には上流から赤オプシン遺伝子、緑オプシン遺伝子の順に遺伝子が並んでいるが、この両方の遺伝子の発現を制御している領域が赤オプシン遺伝子の転写開始点上流4,000塩基対付近に存在し、そこに変異が生じると赤オプシン遺伝子と緑オプシン遺伝子の発現を同時に失うことになる<sup>3)</sup>。この変異はX染色体に存在することから、伴性劣性遺伝の遺伝形式をとる。第1回の1.6節で説明したように、X染色体の変異は男性よりはるかに低い頻度で女性でも表現型が顕在することがあるが、錐体1色型色覚の発生頻度は男性でもきわめて低く、女性では事実上起きることはない。

錐体1色型色覚の人の網膜には、青錐体と杆体しか視細胞が存在しない。錐体は明所において光の強弱を知覚し(光覚light sense)、視力(形態覚visual acuity)と色覚(color vision)の両方に寄与している。一方杆体は、暗所において光覚を司るものの、形態覚は不良で、しかも明所では機能しない。通常、錐体の9割以上を占めるのは赤錐体と緑錐体であり、青錐体の数は全体の数%に過ぎない。そのため大多数の錐体が機能を失った錐体1色型色覚では、視力は0.1~0.3と低い。この低い視力は錐体細胞の減少による網膜の分解能自身に起因する視力低下であるため、近視のようにメガネで矯正することはできない。明所では青錐体だけ、暗所では杆体だけしか機能しないため、色の弁別能力のない1色型色覚となる。しかし適度な薄暗い環境(薄明視)においては青錐体と杆体の両方が機能することが可能であり、吸収極大波長419nmの青視物質と吸収極大波長510nmの杆体視物質ロドプシンを使って色の弁別能力を発揮し、2色型色覚となることがある<sup>2)</sup>。

これに対し杆体1色型色覚では、すべての錐体の機能が失われている。これは第2染色体に存在するcGMP依存性陽イオンチャンネル遺伝子の変異が原因であり<sup>4)</sup>、常染色体劣性の遺伝形式をとる。頻度はやはり稀で、0.003%と推定されている。錐体の機能がないためにすべての視覚機能を杆体

\*13 学校健診の色覚検査で用いる石原表は赤緑色盲の検出を目的としているため、第3色盲は検出されない。また第3色盲は自覚症状に乏しいので、それだけのために眼科を訪れることはまずない。診断方法や診断基準の不備のために、眼科でも見過ごされている事例もあると考えられる<sup>2)</sup>。赤緑色盲の確定診断に用いるナーゲル型アノマロスコープは緑~赤領域の色合わせ法のための検査機器であるが、第3色盲の人はこれでは色盲でない人と同じ所見を呈することになる。青~緑領域の色合わせ法には別のMoreland型アノマロスコープを用いる<sup>2)</sup>。パネルD-15テストでは第3色盲に典型的な並べ方をした場合には第3色盲を強く疑うことができる。いずれにせよ、赤緑色盲の検出並みに徹底して調査すれば、もう少し頻度が高くなる可能性がある。

\*14 色盲でない人が第3色盲のシミュレーションを見ると、これが色盲でない人にもっとも近い見え方だと感じられるが、赤緑色盲の人がこの第3色盲のシミュレーションを見ると、他の3つとは1つだけかけ離れた、似ても似つかない画像に見える。赤緑色盲の人は青の情報に大きく依存して色を弁別しているために、青情報の欠けた画像は元画像とまったく異なった色に見えるわけである。赤緑色盲の人が似ても似つかないと感じるこの第3色盲のシミュレーションは、赤緑色盲の人がなんらかの原因で後述の後天青黄色盲を呈した場合の色覚にほぼ相当する。

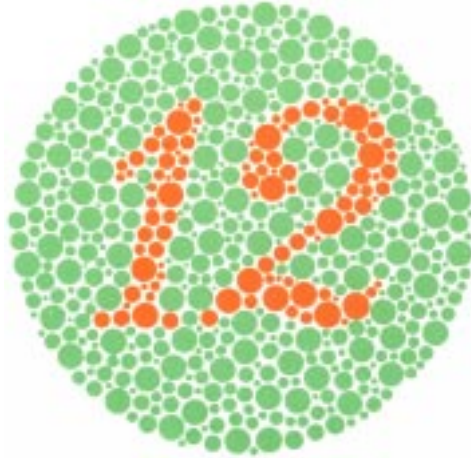


図12. 石原表の第1表

全色盲の人が唯一判読できるとされる表。これ以外の表でも明度差をうまく使って判読できることがある。  
財団法人一社会より許可を得て、石原綜合色盲検査表((株)はんだや)から転載。ただし複製のため印刷の色調は多少異なり、色覚の判定には使えないので注意されたい。

に依存することになり、0.1以下の低視力や色弁別能の欠如が生じる。杆体は明所では機能しないため、明るいとこではほとんど物が見えない明所視障害(昼盲)を生じる。しかし薄暗いところにおいては形態覚を有している。明るいとこでは濃いサングラスをかけて眼に入る光を制限することで、視覚をある程度回復することができる。

全色盲では色相も彩度も判別できなくなるが、唯一の視覚情報である明度情報を上手に利用して視知覚を補っていることが多い。石原表では全色盲の人が唯一読める表として、明度の異なる2色のみを用いて文字を構成した第1表が準備されているが(図12)、その他の表においても微妙な明度差情報を活用して図柄の判別が可能な場合もある<sup>2)</sup>。

## 2.5 後天色盲<sup>\*15</sup>

「後天色盲」とは、先天色盲を除くすべての色盲を指している。「先天」とは「生まれつき身に備わっていること」を指し、「後天」とは「生まれてから身に備わること」を意味するが、後天色盲の「後天」の定義はこの意味から離れ、角膜から大脳に至るいずれかの領域の機能低下によって起こった色覚変化のうち、これまで説明してきた先天色盲を除くすべての色盲がここに含まれる。例えば、第3染色体に原因遺伝子がある遺伝性疾患に、青黄色盲の症状を示す常染色体優性遺伝性視神経萎縮(若年性家族性視神経萎縮)というのがあるが、この疾患の形質は生まれたときから変わらない

「先天」であるものの、「後天色盲」に分類されている。

先天色盲が特定の遺伝的背景の人が生まれながらに持つ色覚のタイプであるのに対して、後天色盲は遺伝的背景に関わらず、誰にでも発症する可能性があるものが多いのが特徴と言える。その原因は、角膜、水晶体、硝子体といった中間透光体の着色によるもの、網膜病変によるもの、緑内障によるもの、視神経病変によるもの、大脳性病変によるもの、心因性要因によるものなど様々であるが、何よりもすべての人に関係する問題として、加齢に伴う色覚の変化がある。

A: 白内障(水晶体の着色)

加齢による色覚の変化のうちもっとも頻度の高いものは、水晶体に着色が生じる白内障(cataract)に起因するものである。平成11年の厚生省患者調査によれば、国内の白内障の総患者数は145.7万人であり、そのうち65歳以上の患者が124万人となっている(65歳以上の人口は2,200万人なので5.6%に相当する)。ゆっくり進行し誰にでも起こりうる加齢変化であるので、すべての人が眼科を受診しているわけではないが、このために通院している人が65歳以上の男女合わせて20人に1人以上いることは、白内障の症状を自覚する人が多いことを示している。加齢に伴う水晶体の変化としては、水晶体の厚みの増加、散乱光強度の増強、水晶体核部の着色などが挙げられる。着色した水晶体は一種のフィルターとして機能し、光の透過率を全般に低下させるだけでなく、短波長の光の透過率を特に減少させる(図13)。このため網膜には青い光が到達しにくくなり、短波長領域の色の弁別能力が大きく低下し、見ている世界が段々黄色、茶

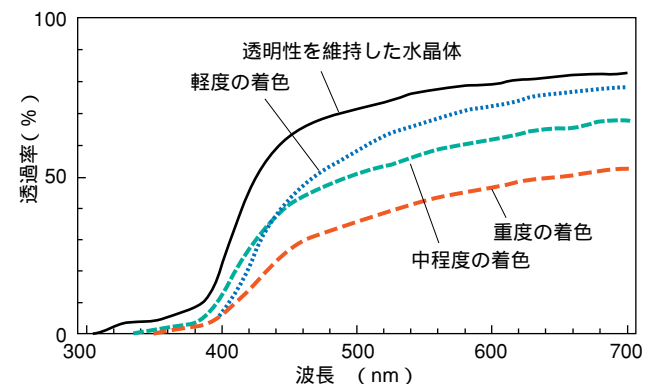


図13. ヒト水晶体囊外摘出核の混濁程度別分光透過率

白内障手術によって摘出された水晶体核部の切片を用いて計測したもの：着色した水晶体は可視光線全域に渡って光の透過性を下げるが、短波長領域では特に低下しているのがわかる。坂本保夫：視覚の科学(1994)15:198-205より改変。

\*15 「後天色覚異常」と呼ばれることもあるが、加齢に伴い非常に多くの人に普通に起こる症状を一概に「異常」と規定してよいのか疑問もある。本稿では先天色盲同様に、価値判断を含まない「後天色盲」の用語を用いる。



オリジナル



白内障のシミュレーション



図 14. 黄昏れの遺伝学の聖地

左:オリジナル画像,右:白内障のシミュレーション.水晶体の着色による青チャンネルの大幅な減少と緑チャンネルの中等度の減少(結果として赤みがかって見える),さらに水晶体での光の散乱による視力(形態の分解能)の低下をPhotoshopでシミュレートした.ちなみに写真は1902年にメンデル再発見を記念して生地チェコオドラウ郡ヒンツィーチェ村に寄贈された記念碑つきの消防団詰め所(<http://jfly.nibb.ac.jp/html/Tsuushin/mendel/>参照).

色赤みがかってくる.また白濁した水晶体での光の散乱により,視力(形態覚)が低下する(図14).

同じ画家の絵を年代を追って観ることはその画家の視覚の変化を観ることになるが,その中には白内障による色覚変化の影響もしばしば含まれていて興味深い.例えば“睡蓮”の絵を200点以上残しているクロード・モネ(1840~1926)であれば,20歳代の作品から追うことができる.68才(1908年)のときに視力の低下を自覚したモネは幾人かの眼科医を受診し,1912年に両眼の白内障の診断を受ける.そしてその11年後の1923年1月(82歳)に着色した水晶体を取り除く手術を右眼だけ受けている.視力低下を自覚した数年後から明らかな白内障の影響が作品に出ており,描いた年代を追って「睡蓮」や「日本の橋」を観ていくと,色調が次第に赤みがかっていき,手術を受ける直前に描いた「日本の橋」(フィラデルフィア美術館所蔵)では真っ赤になっている<sup>\*16</sup>.またモネは手術した年に,白内障のままの左眼と水晶体を取り除いた右眼のどちらか片方だけを使って同じ風景を見た2枚の絵を描いている(マルモッタン美術館所蔵).この2つの絵を比較すると,白内障の眼を用いて描いた絵は青みに欠け,全体的に赤みがかった<sup>\*17</sup>.

現在の白内障の手術では着色した水晶体の核を超音波で破砕吸引し,そこに樹脂で作られた眼内レンズを挿入するが,白内障の手術を終えた患者さんの多くが空の青さに驚く.75歳の人の水晶体では400~450nmの光の透過率は0~15%まで低下しているが,手術で装着する眼内レンズでは80~90%も透過するようになるためである.網膜に到達する光自体が着色した水晶体というフィルターを通してから届くため,白内障における色覚変化は先天性盲のような

特定の分光吸収特性を持つ錐体が失われた場合と質的に異なり,黄色や茶色のサングラスをかけて短波長の光を遮断した状態とほぼ同じだと言える.

#### B:網膜病変や緑内障によるもの

中心性漿液性網脈絡症(idiopathic central serous choroidopathy),網膜色素変性症(pigmentary retinal degeneration),糖尿病性網膜症(diabetic retinopathy)などの網膜疾患では,錐体が障害を受け,機能するものの数が減ってゆく.数が多い赤錐体や緑錐体に比べ,青錐体は全体のおよそ数%しかいないため,網膜障害の初期から影響を受けやすい<sup>5)</sup>.また,緑内障(glaucoma)は眼球の内圧(眼圧 intraocular pressure)が上昇する疾患であるが,大きな神経細胞の方が眼圧の上昇に対して脆弱であり,青錐体系の神経節細胞は赤・緑錐体細胞系の神経節細胞よりも大きいことから,他の錐体細胞も影響を受けるものの,青錐体系は特に障害を受けやすい<sup>6)</sup>.これらの結果青錐体の機能が大きく低下し,青黄色盲の症状を呈する.

さらに病状が進行すると,緑錐体や赤錐体の機能にも影響が及び,赤緑色盲の症状が加わってくる.つまりその発症機序からして,後天赤緑色盲では先天赤緑色盲と異なり,青黄色盲の症状が合併する.さらに病状が進行すると最終的には全色盲様の症状を示すことになるが,それに先行して黄斑部や硝子体に出血やフィブリンの析出が生じ,それらの収縮に伴う牽引によって網膜剥離などが生じるなど,錐体の機能不全以外にも多くの原因によって視力が大きく低下する.

#### C:視神経病変によるもの

視神経(optic nerve)は眼球から間脳の外側膝状体に伸びる軸索の束であるが,この軸索は網膜の神経節細胞に由

\*16 日本でも「睡蓮」を年代を追って観ることができる.以下は制作年と所蔵美術館.1898年:鹿児島市立美術館.1903年:ブリヂストン美術館.1906年:大原美術館.1907年:東京富士美術館,ブリヂストン美術館,川村記念美術館,アサヒビール大山崎山荘美術館.1916年:国立西洋美術館.1917年:群馬県立近代美術館,アサヒビール大山崎山荘美術館.1918年:MOA美術館.1919年:北九州市立美術館.

\*17 The EYE of the ARTIST(Michael F. Marmor, James G. Ravin共著, Mosby出版, 1997, ISBN 0-8151-7244-3)は,著名な芸術家の作品を眼科医の独創的な視点から解析している.モネやカサットの作品における白内障の影響や,ドガやオキーフの眼疾患,エル・グレコやルノワール,ファン・ゴッホの絵画に眼疾患の影響があるかなどが論じられており,白内障の手術後にモネが描いたこの2つの作品も収録されている.

来する(図1)。視神経病変においては赤緑色盲様(第2色盲様)の変化をすることが多いと言われているが<sup>7)</sup>、同時に青黄色盲様の色覚変化も伴っていることが、やはり先天赤緑色盲と異なる特徴と言える。光の波長情報は錐体において3種類の錐体信号として出力された後、双極細胞、水平細胞、アマクリン細胞によって情報処理され、神経節細胞において赤・緑と青・黄の2対の反対色チャンネルの情報に変換されて、神経節細胞から視神経を通じて脳へ伝えられる。よって視神経の病変では、この赤緑チャンネルと青黄チャンネルの情報の変化が症状の基盤となっており、病変の大きさによって赤緑色盲様の色覚変化と青黄色盲様の色覚変化が様々な割合で生じることになる。

#### D: 大脳病変によるもの

両側の下部後頭葉に脳梗塞が生じると大脳性色盲(cerebral achromatopsia)を呈することがある<sup>8)</sup>。大脳皮質内腹側面に存在する紡錘回を含む領域が障害されると、他の視覚機能は保たれたまま、見ているものすべてがモノクロになってしまう。脳梗塞では大脳症状の発症に伴って急激に見ている世界がモノクロになるという。大脳のその他の領域の障害では、色名と色感覚の結び付けが困難な色失語(color aphasia)などの症状を呈することも知られている。

#### E: 心因性要因によるもの

学校や家庭生活のストレスに起因した心因性視力障害(psychogenic visual disorders)は、小児、児童に多く、視力低下や視野狭窄、色覚の変化などが生じる<sup>9)</sup>。成人例ではヒステリーなどの精神症状を伴うこともある。心因性視力障害では、石原表やパネルD-15テストのような色覚検査を行うと、各種典型的な色盲への分類が不可能な検査結果が生じる。既知の論理で説明できない検査結果となること自体がこの疾患の特徴と言える。他の心因性の諸症状と同様、発達期の女子では男子より頻度が高いとも言われており、また先天赤緑色盲は女子では極めて頻度が低いこととも相まって、学校健診の色覚検査で「異常」を指摘される女子児童の中には、この心因性要因によるものが少なくない。

女子が色覚検査で「異常」を指摘された場合、一般に知られている赤緑色盲の遺伝形式からすれば、母親が保因者で、かつ父親が赤緑色盲であると想像される(例外は第1回1.6節を参照)。もし父親が赤緑色盲でない場合、「この子は私の娘ではないのか?」といった家庭争議の原因となることもある。遺伝学的に説明しにくいこのようなケースでは、むしろ心因性視力障害が強く疑われる。学校の健診ではあくまでも「色盲の疑い」を指摘できるだけであり、色盲の有無や

種類の診断は専門の眼科医でないと不可能なので(第1回1.8節参照)、受診して相談することが強く望まれる。

#### F: 後天色盲の色覚

後天色盲は、いずれの原因においても他の眼症状を伴っており、症状が進行性であったり、増悪、緩解を繰返したり、左右の眼の疾患の進行度の違いから色覚に大きな左右差が生じることがあるなどの特徴を持つ。後天色盲では健康なもう一方の眼との比較や、異常が生じる以前の記憶によって、色覚の変化を本人が認識できることがある。これは一生に渡って色覚が変化することなく(ヘテロ接合体の女性を除いて)色覚に左右差が出ない先天色盲とは対照的である<sup>\*18)</sup>。

後天色盲でもっとも多い、後天青黄色盲の色感覚をまとめると次のようになる。

- ・青の範囲が広く、健康な眼の青紫～青～青緑～緑～黄緑までを青として知覚し、緑の感覚を失う。
- ・黄色は彩度が低下して白っぽく見える。
- ・低明度、低彩度の色は、ほとんど青または無彩色に見える。
- ・「黄色」「白」「緑」「青または黒」「茶」「紫または黒」「紫」「青、茶、黒」「青」「黒」などの色誤認をする。

なお、先天赤緑色盲の人が後天青黄色盲を合併すると、全色盲様の色覚になることが知られている。赤緑色盲の読者であれば、図3の第3色盲のシミュレーションを見ることで疑似体験できる。

## 2.6 色の定量的表現法と色盲での色の見え方

ここまで各種の色盲における色の見え方について説明してきた。これらの特性は定量的にはどのように考えることができるのだろうか?色覚バリアフリーを実践するためには色の表現法や指定法への理解が欠かせない。そこでこの節では本論から少し離れるが、色表現の方法とその中で色盲がどのように捉えられるのかについて、なるべく生物学者になじみの深い方向から説明を試みたい<sup>\*19)</sup>。

#### A: RGB値による色表現

パソコンで画像を作ることが多い我々にとって、色を数値で表わすのに最もなじみの深い方法は赤(Red, R)、緑(Green, G)、青(Blue, B)の3原色の混合比率をR, G, Bの3つの数値で表わす方法である(図15A)。これはテレビモニターの各画素のように自ら発光する光を重ね合わせで色を作るやりかた(加色法)である。数値は0～100%の割合で示したり、0～255の8ビットの数や00～FFの16進

\*18) ヘテロ接合体の女性では片眼のみが色盲になることがある。詳しくは第1回1.6節を参照されたい。

\*19) 詳しくは「色彩工学の基礎」池田光男・朝倉書店(1980)や「先天色覚異常」北原健二・金原出版(1999)を参考にされたい。

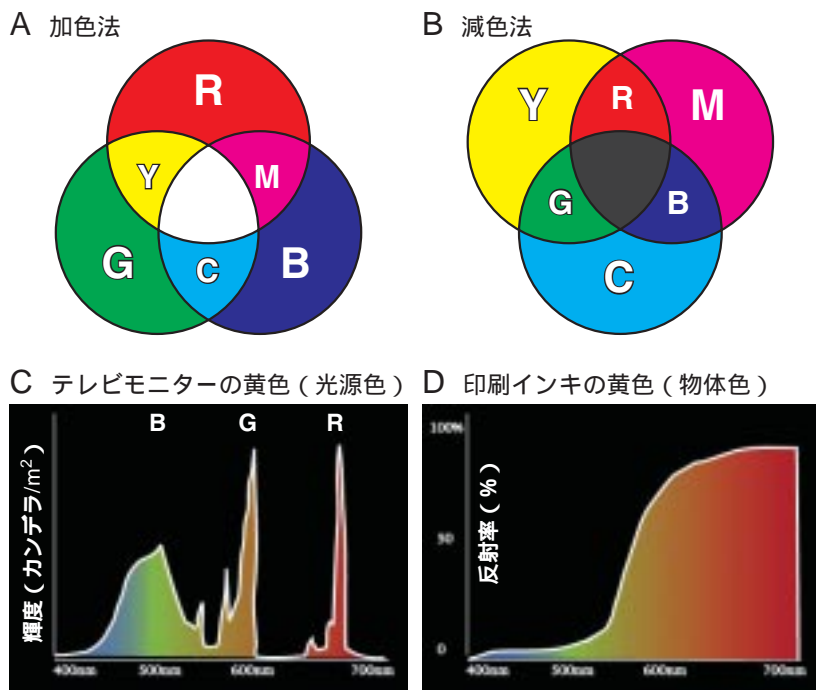


図 15. 加色混合と減色混合

A: 加色法とB: 減色法による色の重ね合わせ. C: テレビモニターでRGBの信号を加算して作られた黄色のスペクトル(波長別輝度). D: 印刷に用いられる黄色インキのスペクトル(波長別反射率) 相対分光分布の波長別成分が光源色と物体色でこれほど違っていても、眼には同じような色として知覚される。

Yasuyo G. Ichihara: SPIE The International Society for Optical Engineering EI2000 Internet Imaging (2000) 3964: 168-174 より引用。

数で表わしたりする .R ,G ,B = 0 ,0 ,0% が黒で ,100 ,100 ,100% が白となる。

RGB値は3色の光を合成した場合の色であるので、絵具を混ぜ合わせた色(次節参照)とは混同しないように注意しないとならない。RGB表現で緑に赤を足すという場合、Gの値をそのままにしてRの値を増やすことを意味するが、これ

は緑の絵具に赤の絵具を混ぜるのとはまったく異なる結果になる\*20。

RGBの値は、テレビモニターの3色の蛍光体の輝度に変換され、加算されて眼に届く。蛍光体が出す光の極大波長(液晶モニターの場合は画素ごとの色フィルターの極大透過波長)は、赤が約610nm、緑が約550nm、青が約470nm付近だが、メーカーによって多少異なる\*21。また人間の眼は明るさを指数関数的に感じるので、RGBの値をそのまま正比例して画面の輝度に変換すると、中間調が明るくなりすぎて不自然に感じてしまう。そこでモニターは中間調をわざと暗めに表示しているが、その度合いはシステムによって異なる\*22。またRGB各100%の白をどのような色あいの白で表現するかも、様々な設定がある\*23。微妙なアナログ機器であるテレビや液晶モニターは、経年変化による色変化も大きい。

このようにRGB値によって指定した色は、実際の画面でどのような色に表示されるかが機械ごとに大きく異なってしまう。このような指定法を機種依存(device dependent)な色表現と言う。このためRGB値による色表現は色の傾向を一般的に把握

するにはよいが、厳密な色指定や色の議論には適していない。

B: CMYK値による色表現

絵具や印刷インクを重ね合わせて色を作る場合、それぞれの色は入射光を吸収して、残った光だけが反射され、その色が眼に届くことになる。複数のインクを混ぜ合わせれば、吸

\*20 RGB表現で緑に赤を足すと黄緑や黄色になるが、緑の絵具に赤を混ぜると茶色や黒になる。

\*21 テレビモニターの赤蛍光体の光は、赤錐体の吸収極大波長(558nm)より大きく長波長側に寄っている。赤錐体を欠く第1色盲の人には、この波長域の光はごく弱くしか感じられない(図7)。したがって第1色盲の人はコンピューターのRGB色表現でRの値を増減させても、GとBの値に変化がなければ色はほとんど同じに見える。グラフィックソフトの「Photoshop」で画像を開いて赤チャンネルの明るさだけを大きく増減させても、ほとんど変化が感じられない。緑蛍光体や青蛍光体の光は緑錐体(531nm)や青錐体(419nm)の吸収極大波長と近似しているが、これらの波長域は緑や青以外の錐体でも受容される(図2)。したがって緑錐体や青錐体の機能を欠いた第2、第3色盲の人は、第1色盲と異なりRGB色表現でのGやBの値の変化を感じることができる。

\*22 RGBの値が100%の最明部に対して50%の中間調は、Windowsパソコンでは $0.5^{2.2} = 21.8\%$ 、Macintoshパソコンでは $0.5^{1.8} = 28.7\%$ 、放送用テレビ(NTSC)では $0.5^{2.5} = 17.7\%$ の輝度で画面に表示するよう規格で定められている。この2.2, 1.8, 2.5などの乗数を「ガンマ値(gamma)」と言う。ガンマが高いほどメリハリのついた鮮やかな画像になるが、自然な感じは失われる。同じRGB値でもガンマ値の異なるモニターで表示すると、眼の錐体に到達する実際の明るさ(刺激値)は大きく変わってしまう。

\*23 RGB各100%の白をどのような色あいで表現するかを白色点と呼び、物質を高温に熱したときに放つ光の色に対応させて色温度K(ケルビン)で表わす。普通の紙の白色(ペーパーホワイト)は物質を約5,000Kに熱した時に放つ光とほぼ同じ色あいなので、5,000Kと表わす。昼間の屋外光は太陽からの直射光と天空からの青い光の合算で、約6,500Kになる。青白い天空の光だけで12,000K以上になる。印刷や写真業界では紙に合わせて白の基準を5,000K(昼白色とも呼ぶ)に取ることが多く、写真用ライトボックスの光源などはこの値に調整されているが、コンピューターを使った印刷(DTP)や、色彩工学や眼科の世界では、昼色光やコート紙や印刷紙の白色に近い6,500Kを基準に用いることが多い(D65と呼ぶ)。医療用のシャカステン光源は6,700K(昼光色とも呼ぶ)が多い。一方テレビ画面は青みが強い方が派手で鮮やかに感じられるため、ほとんどのパソコンモニターは出荷時には白色を9,300Kに設定してある。この条件ではRGB値で指定した色は、D65の場合よりかなり青みがかって表示されてしまう(余談になるが画面の色と印刷色とを近づけるには、まずモニターの色温度設定を6,500Kに変えるとよい。最初は画面が黄ばんで見えて違和感があるが、色順応ですぐに慣れる)。



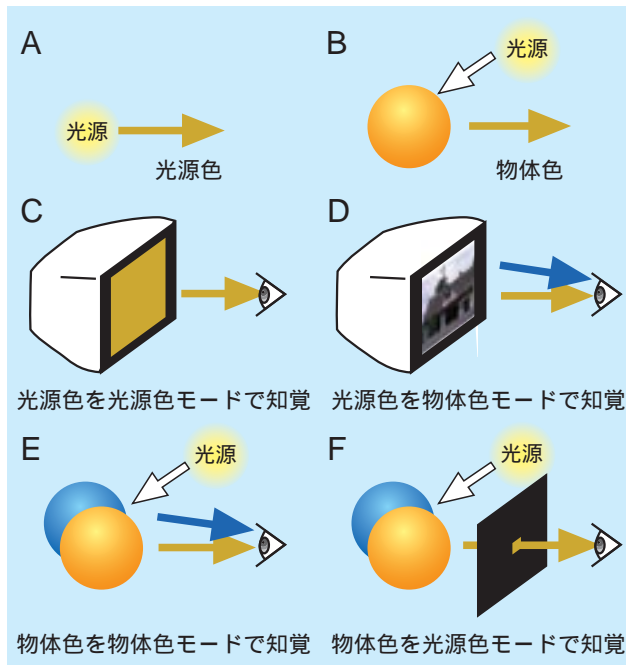


図 16. 光源色と物体色, 光源色モードと物体色モード

光をどのような形で見るかによって, 色の感じ方は大きく異なる。

収される光成分がそれだけ増え, 眼に届く光はそれだけ減ることになる。このような色の重ね合わせを減色法と呼ぶ。

減色法で様々な色を再現するには, シアン(明るい青色, Cyan, C), マゼンタ(赤紫, Magenta, M), イエロー(黄色 Yellow, Y)を3原色に用いるのが一般的である(図15B)。CMYをすべて重ね合わせると黒になるはずだが, インクの色純度の限界から実際には完全な黒にならない。そこで実用上は, 黒インク(Black, Bと混乱しないように末尾を取ってKと略す)を加えたCMYKの4色で色を表現する。

CMYKの値は, 印刷機で4色のインクをそれぞれの程度の濃さで刷るかを示した数字そのものである。したがってインクの色あいや用紙, 印刷機の違いによって印刷される色は微妙に異なり, RGBと同様CMYK値から実際の色が厳密に決まるわけではない。ただしモニターの調整が各個人によって非常にまちまちなのに, 印刷ではどのCMYK値

がどのような色になるかを示した色見本帳を大手インク会社が作成・配布しており, 印刷所はこれに対応して色の仕上がりを調整している<sup>\*24</sup>。したがってRGBに比べるとCMYKのほうが, 機種による色の差ははるかに小さい<sup>\*25</sup>。

2.2節Gで示したように, 同じ色名で表わされる色でも色盲の人にわかりやすい色あいとわかりにくい色あいがある。微妙な色あいの指定を印刷会社に伝えるには, CMYK値による指定が最も実用的かつ確実である<sup>\*26</sup>。

C: 光源色と物体色

ここまであえて厳密な区別をしなくていいが, 眼に入る色には2つの種類がある。1つは光源から直接眼に入る光で, 光源色(light source color)と呼ぶ(図16A)。もう1つは光源から物体に反射して眼に入る光で, 物体色(object color)と呼ぶ(図16B)。光源色は, レーザーや水銀ランプの輝線, 蛍光色素のように単一の波長から成る場合もあれば, テレビモニターの画面のようにいくつかの波長の光が足し合わされている場合や, 太陽や白熱電球のように連続したスペクトルの場合もある。物体色はほとんどの場合, 連続したスペクトルである。図15C, Dのように, まったく異なったスペクトル分布であっても, 人間の眼には同じ色として感じられる<sup>\*27</sup>。

一方人間が色を感じる感じ方には, 2つの状況がある。1つは色を, 肌理, 皺, 艶などとともに物体の表面の質感として感じているときの状況で, これを表面色(surface color)と呼ぶ。「物体色モード」と呼ぶこともできる(図16D, E)。もう1つは色を物体の属性から切り離し, 光そのものの色として感じているときの状況である。たとえば黒い紙で視野を覆い, そのまん中にあけた穴から光が差し込んでくるような状況である(図16C, F)。このときに感じる色を開口色(aperture color)と呼ぶ。「光源色モード」と呼ぶこともできる。

同じ色でも光源色モードで感じる場合と物体色モードで感じる場合では, 人間の眼には大きく異なって見えることがある。たとえば「茶色」や「肌色」は, 物体表面の色としてしか知覚し得ない色である。黒い紙にあけた小さな穴を通して, 物体の色とは意識しないようにしながら光源色モードで見ると, 茶色は彩度の低い暗いオレンジに, 肌色は

\*24 日本だと大日本インキのDICや東洋インキのTOYO, アメリカではPANTONEの色見本帳が普及しており, 印刷会社や製図用品店で入手できる。パソコンの画像データに指定されたCMYK値をどのような色で印刷するべきかは, 日本ではJapan Color, アメリカではSWOP, ヨーロッパではEuroscaleという標準が定められている。CMYKの図版の作成時は, 論文を投稿する国に応じて「Photoshop」などのグラフィックソフトでこれらの設定を使い分けるとよい。

\*25 ただしカラーレーザープリンターやインクジェットプリンターで印刷する場合は, メーカーによってCMYK値と印刷色の対応関係の設計が異なるので, 同じ色に仕上がることは期待できない。高級なポストスクリプトプリンターであれば各インキ会社の色設定をシミュレーションする機能が付いているので, これを使うとある程度の一貫性は期待できる。

\*26 後述するマンセル値やCIE色度値で指定するほうがより厳密ではあるが, これらの方法で色を指定してすぐに意味を理解してくれる印刷業者は多くはない。

\*27 このようにたとえ正常3色型色覚であっても, まったく異なるはずなのに眼では区別できない色は無数に存在する。このような色も, 人間よりも多い4種またはそれ以上の視物質を持つ生物には, 違う色として認識される。将来このような眼を持った宇宙人が地球にやってくるのであれば, 彼らは正常3色型色覚の地球人も「色盲」と呼び, 「図15C, Dのような異なる色を, 地球人は同じ色だと思いこんでいる」と母星に報告することだろう。

彩度の低いオレンジにしか感じられない<sup>\*28</sup>。また光源色は厳密に光の波長と強度だけで「580nmの光は黄色」のように一義的に決まるが、物体色は光源の波長や背景の色、さらに「夏の空は深い青」などの記憶や常識にも影響される。リングが異なる照明下にさらされていても、眼が色度に順応することによって同じ色に見えてくる「色順応」は、物体色モードだけの特徴である<sup>\*29</sup>。

このように色覚は、単に錐体の出力を演算処理したものではなく、より深い知覚に根ざした複雑な感覚である。色盲の人は、純粋に色だけを感じる光源色モードに比べ、物体色モードでは表面の質感などの情報や記憶や常識なども動員できるぶん、色の感じ方をかなり補うことができる。色覚検査の結果から予想されるほど日常生活で色に困ることが少ないのには、こういった要素が影響している可能性もある。

#### D: マンセル表色系

物体色を厳密に定義するのに昔から使われてきたのが、画家であったA. H. Munsellが最初に提唱したマンセル表色系(Munsell color system)である。この方法では色を概念的な要素に分類し、色あい、明るさ、色の鮮やかさの3要素で表わす。色あいは色相(hue)と呼ばれ、マンセル表色系ではスペクトルの順に赤から紫までを心理的に等間隔に5等分して赤R、黄色Y、緑G、青B、紫Pの5つの基本色相が置かれている。さらに人間の眼は、スペクトルとしては遠く離れた紫と赤の間の中の色あい(赤紫)を感じることができるので、これを介してすべての色相を環状に配置した(図17A)。補色関係にある色は円の中心を挟んで正対する。色の明るさは明度(value)と呼ばれ、反射率0%の真っ黒を0、反射率100%の純白を10として心理的に等分する。眼に同じ明るさに感じられる色は、同じ明度に割り当てる。したがって黄色は高めの明度、赤や青や紫は低めの明度になる。また色の鮮やかさは彩度(クロマ, chroma)と呼ばれ、無彩

色(クロマ0)のグレーに比べて心理的に感じられる色味の量がどれくらい多いかを表わす。マンセルは、当時入手可能だったもっとも鮮やかな色材の彩度を9としてクロマを等分したが<sup>\*30</sup>、最近はもっとも鮮やかな色材もあり、単位をそのまま外挿してクロマ14のように表わす<sup>\*31</sup>。

色相と彩度を円内の位置で表わし、明度を高さで表わすことで、すべての色を三次元空間の立体で表現することができる。これがマンセルの色立体(color solid)である(図17B)。色によっては、言葉では表わせても実際には存在しないものがある。たとえば「鮮やかで暗い(クロマが大きくバリューが小さい)黄色」や、「明るく鮮やかな紫」はありえない。このため色立体は非対称な形状になっている<sup>\*32</sup>。

マンセル表色系を用いると、表示装置に関係なく機種非依存的(device independent)に、物体の色を色相、バリュー、クロマの3数値で厳密に表わすことができる<sup>\*33</sup>。JIS規格では、これと後述のCIE xy色度(2.6節G参照)を利用して道路や安全標識などの色を規定している<sup>\*34</sup>。たとえば緑の標識は「10G 4/10」(青と青緑の中間で、明度4、彩度10)の色に決められている<sup>\*35</sup>。マンセル表色系はインテリアやカラーコーディネートの世界でも、色指定の方法として広く使われている。

マンセル表色系では、色盲の症状は「同じ明度、彩度で、色相だけが異なる場合、一部の範囲の色あいが見分けにくい」と表現できる。逆に同じ色相でも、明度や彩度が異なれば容易に弁別できる。

#### E: コンピューターで用いられる疑似マンセル色表現

マンセル表色系で提唱された色相、明度、彩度の概念は直感的でわかりやすく、色を厳密に規定できるにもかかわらず、色相の指定法が単純な数字でないためか、コンピューターの色指定で用いられることはない<sup>\*36</sup>。この世界ではマンセル表色系からいくつかの点を改変したHLSやHSB色表

\*28 一部の文具メーカーが、「肌色」は特定の人種の色を示している人種差別にあたるとして、最近色名を「ペールオレンジ」(pale orange)に変えている。

\*29 光源色モードと物体色モードでは、残像の見え方も異なる。物体色モードで1つの色を見続けて(例えばテーブルに置いた黄色い物体をずっと見続けて)、それから視野を無地の壁に移すと、補色の残像が見える。一方光源色モードで1つの色を見続けて(例えば黒い視野の中央の黄色い光を見続けて)、それから光を消すと、同じ色の残像が見える。

\*30 当初は最低のクロマを1、最高を9とし、ちょうど中間に感じられる色をクロマ5、1と5の中間を3、3と5の中間を4、のように等分した。

\*31 自然界の花の色などには、クロマが20近い鮮やかな色も存在する。

\*32 光源色モードでは色の明るさは光源からの光の強さとして知覚されるので、同じ色で非常に暗い光から非常に明るい光まで存在しうる。一方物体色モードでは、色の明るさは物体表面からの反射として知覚されている。明るいものは光を多く反射するものであり、したがって明るいと同時に白っぽく感じる。一方、暗いものは光を反射しないので、暗いと同時に黒っぽく感じる。明度の概念と白みや黒みの概念がリンクしているのが物体色モードの1つの特徴である(図17D, E)。

\*33 様々なマンセル値の色を正確に印刷した「マンセル色票」が市販されており、これと比較したり測色計で測定することで、物体の色をマンセル値で表現できる。ただしマンセル表色系はあくまで物体の色について定められた系であり、光源色に用いることはできない。

\*34 厳密にはJISなどの工業規格に採用されているのは、1905年に提唱された当初のマンセル表色系をもとにCIE表色系(後述)との整合性を考えてより定量性を増すように後年修正された「修正マンセル表色系(Munsell renotation color system)」である。

\*35 青みがかった緑にすることで、色盲の人にも赤や黄色と見分けやすくしてある(図9B参照)。

\*36 マンセル表色系では厳密な規定に基づいて色を正確に指定できるのに対し、本節で説明するHLSやHSBの色表現は、RGB色表現同様にコンピューターの機種や設定次第で色が変わってしまう。現在普及しているコンピューターのグラフィックソフトでは、マンセル表色系とCIE表色系(後述)という工業規格に採用された厳密な方法で色を指定することができない。これは色による確実なコミュニケーションを進めるうえで、大きな欠陥である。

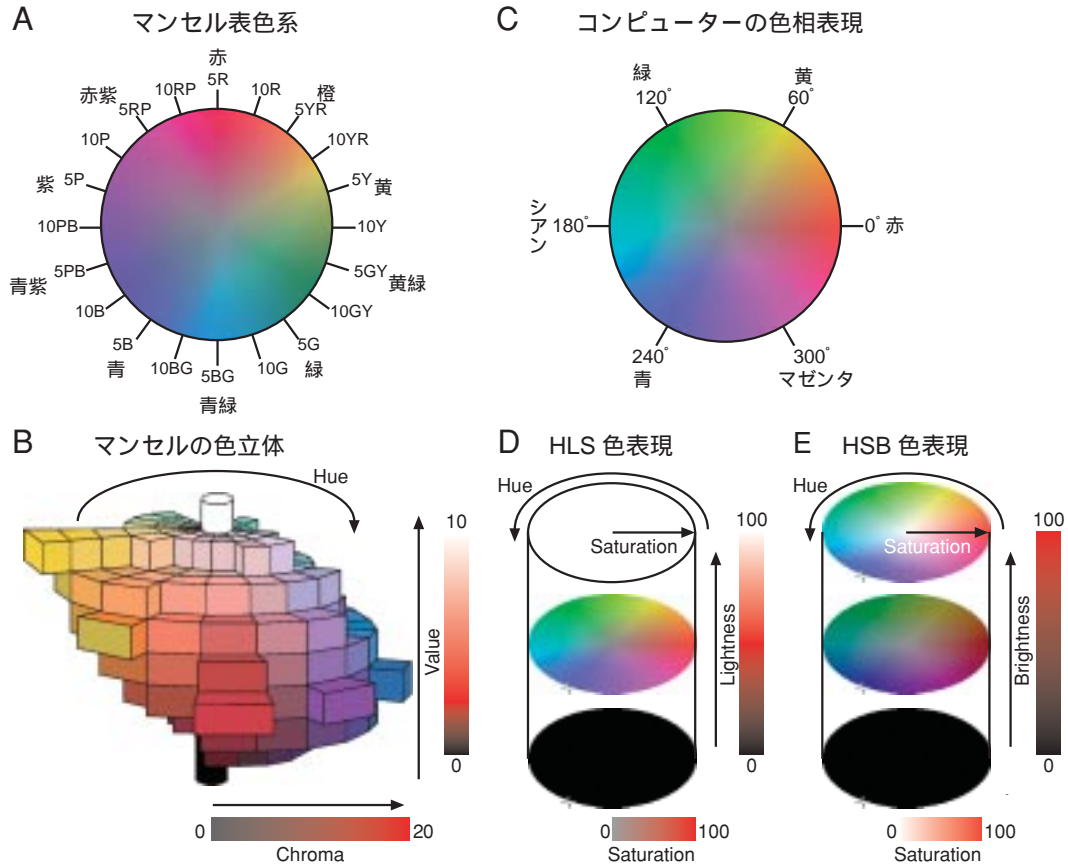


図 17. 色相，彩度，明度による色表現

A: マンセル表色系 . 赤黄緑青紫の5つの基本色 R, Y, G, B, P とその中間色 YR, GY, BG, PB, RP を置き, それぞれの間を 1 ~ 10 に等分して色相を 100 個の領域で表わす . B: マンセルの色立体 . 眼の明るさの感じ方に合わせて配置しているため, 彩度の高い黄色は高い明度, 赤や紫は低い明度になる . C: コンピューターでは光の三原色を用いて色相を 6 等分し, 360 度の角度で表わす . D: マンセル表色系同様物体色に対応した HLS 色表現 . 明度ゼロが黒, 明度最大が白になる点はマンセルの色立体と似ているが, 眼の感じ方に関係なく最も彩度の高い色を明度 50% に割り振っている . E: 光源色に対応した HSB 色表現 . 各色相 (波長) ごとに, 最も明るい単色が明度 100% になるように割り振っている .

現が使われている .

まず色相 (Hue) を 5 つの基本色で表わす代わりに, 加色法の 3 原色である赤緑青 (RGB) と減色法の 3 原色であるシアン, マゼンタ, イエロー (CMY) とを等間隔に配置して, 色を 6 等分する (図 17C). これによって RGB と CMY がそれぞれ正三角形に並ぶようになる . 色相の値は円環上の赤の位置からの角度を使って 0 ~ 360 度で表わす . 赤緑青の 3 原色は 2.6 節 A で示したテレビの蛍光体の色で決まるので, マンセル表色系の赤緑青 (図 17A) とは一致しない . コンピューターの赤 (H=0 度) とマンセル表色系の赤 (5R) はほぼ一致するが, コンピューターの緑 (120 度) はマンセルの緑と黄緑の中間 (10GY) 付近に, 青 (240 度) は青紫 (7.5PB) 付近に来てしまう . また円の中心を挟んで正対する

色は, RGB の計算上は補色の関係 (足し合わせると白になる) になるが, マンセル表色系と異なり, 実生活で感じる心理的な補色とは一致しない .

マンセル表色系と同様に物体色に対応した HLS 色表現では, 明度に Lightness (0 ~ 100%) を, 彩度に色の飽和度 Saturation (0 ~ 100%) を用いる (図 17D). Lightness は物体表面の反射率に対応しており, 0% なら色相や彩度に関わらず黒, 100% なら白となる (つまり同じ色でも明るいほど白っぽくなる) . 心理的に定められたマンセル表色系では色による見た目の明るさの違いの補正が明度に加味されていたが, HLS 色表現では一律に明度 50% が, 白みや黒みがなくもっとも鮮やかな色となる . したがってマンセル系と違い, 同じ明度値でも色相によって見た目の明るさがかなり異なる<sup>\*37</sup> .

\*37 「Photoshop」では, カラー画像をグレースケール画像に変換するさい赤・緑・青の各チャンネルの情報を 30:59:11 の比で配合する . こうしないと人間の眼が感じる自然な明暗にならないのである . これは, RGB 値が同じ赤, 緑, 青があったとき, 緑は赤の 2 倍明るく感じるが, 青は赤の 1/3 の明るさにしか感じないということである . 実際 RGB = 100%, 0%, 0% の赤は, RGB = 0%, 100%, 0% でなく, 0%, 50%, 0% の緑とほぼ同じ明るさを感じられる .



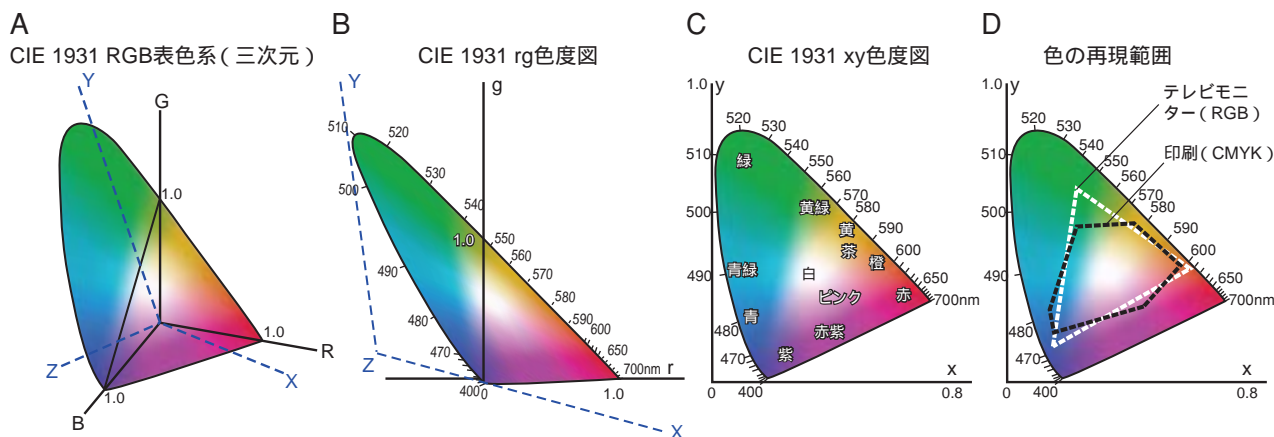


図 18. CIE 表色系

A: R (435.8nm), G (546.1nm), B (700nm) の3原色の組み合わせ比率ですべての色を絶対的な三次元空間に表わしたRGB表色系. B: RGBの値を正規化して二次元平面に投影したrg色度図. グラフの外周がスペクトル上の単色光, 内側が単色光を組み合わせることができる混合色に相当する. C: RGB空間から扱いやすい座標軸XYZに変換し, 正規化して二次元平面に投影したxy色度図. 現在最も一般的で厳密な色表現. D: xy色度図上に表わしたテレビモニターと印刷の色の再現範囲(色域). 鮮やかな緑が印刷では再現できないことがわかる.

一方HSB (HSV) 色表現は, 光源色に対応したものである. この表現では明度は光の強度 (Brightness, Value) であり, 赤緑青など各色の光について, 0%か100%までの明るさが存在する (図17E). したがっていちばん鮮やかな色は明度100%の面に来る. また同じ色相, 明度の場合, 円の内周に行くほど他の色光が足し合わされ, 白色に近く(彩度が低く)なると同時に, 強度も強くなる. 同じ明度値でも色によって見た目の明るさが異なって感じられる欠点は, HLS色表現と同じである. また同じsaturationと呼んでいても, HLSとHSBでは彩度の定義や数値が異なる.

F: スペクトルの色表現とCIE 1931 RGB表色系

第1回に解説したように人間の眼は360~830nmの光を検知する能力を持つが, スペクトル両端では感度は非常に低く, 光を色としては認知できない. 色を感じることができるのは事実上400(紫)~700nm(赤)の範囲である. 各波長の光が色空間のどのような点に位置するのかは, 視野の半分にプリズムで分けた単色光を, 他の半分に赤緑青の3原色を組み合わせさせた色を被験者に見せる装置を使い, 赤緑青をどのような比率で混合すると単色光と同じ色に見えるかを実験することによって測定できる.

色に関する基準を国際的に管理しているのが国際照明委

員会 (Commission Internationale de l'Eclairage; CIE) である. CIEは1931年に表色系に関する規格を定めた. まず定義しやすい3原色として, 赤には知覚の実用上限である700nm, 緑と青には水銀ランプの輝線波長546.1nmと435.8nm<sup>\*38</sup>を用いて, この3者の配合比で色を座標表示することとした. また3原色の強度は絶対的な光の強度そのものでなく, 混合した色が色温度4,800Kの白色に見えるときに必要な各色の輝度を1とし, それに対する相対比で表わすこととした(刺激値と呼ぶ)<sup>\*39</sup>. この方法で色度を規定するのがCIE 1931 RGB表色系である (図18A). これによりすべての色は三次元空間上の一点として表わせる.

明るさを無視して色あいだけを考えるときは, R, G, Bの絶対値でなくベクトルの方向だけがわかればよいので, 合計が1になるように $R/(R+G+B)$ ,  $G/(R+G+B)$ ,  $B/(R+G+B)$ の3数値 $r, g, b$ に変換し, それをrg面に射影することで色を二次元平面で扱うことができる (図に表われない $b$ は $1-r-g$ で計算できる). これがrg色度図である (図18B). 2.6節Aで紹介したコンピューターのRGB色表現と違いCIEのRGB表色系では,  $r, g, b$ の3つの値で色を機種非依存的に厳密に表わすことができる<sup>\*40</sup>.

各波長の単色光は, 3原色を単純に加算しただけではどう

\*38 蛍光顕微鏡のローダミン励起とFITC励起のときの励起光である.

\*39 3原色のうち, 青は暗くても色味に与える影響が大きく, 赤がそれに次ぐ. 3色を混合して白色を作る場合, 物理的な光の強度(単位ルーメン)としては赤27%, 緑70%に対し, 青は3%の強さが必要ない. そのため物理的な光強度をそのまま座標に用いると, 青方向が非常に圧縮された見にくいものになってしまう.

\*40 個体ごとに設定が統一されていないものに依存しているという点では, 人間の網膜による色受容自体が機種依存的な色表現である. 正常3色型色覚の人間でも, 波長別比視感度や白色の感じ方などRGB表色系の基本になるパラメーターに関して, 個人差はあまりにも大きい. CIEではそのために, 標準観測者という架空の存在を設け, その視覚特性にあわせて色度体系を構築することで機種非依存を実現している. しかし規格に合わせて量産できる工業製品と異なり, すべてのパラメーターが標準観測者と一致している個人が実在する可能性は小さい.

しても再現できない場合が多い。この場合、たとえば510nmの単色光に強さ1.3の赤色光(700nm)を混合すると、強さ1.9の緑色光(546.1nm)と0.4の青色光(435.8nm)を混合したのと同じ色を作ることができる。そこで510nmの単色光の色度は、-1.3, 1.9, 0.4というようにマイナスの値を用いて定める。同様に、400nmのように用いた3原色より短波長にある光も単純な加算では再現できないが、この単色光に強さ0.01の緑を足すと、強さ0.02の赤と0.99の青を足したのと同じ色にできる。そこで400nmの色度は、0.02, -0.01, 0.99で表現できる。

#### G: CIE 1931 XYZ 表色系

$r, g, b$ の色度値は多くの場合に符号がマイナスになってしまい、取り扱いに不便である。そこでRGB表色系の三次元空間からすべての色度を正の値で表わせるよう座標軸を適当に変換したのが、XYZ表色系である。XとZは、RGB表色系の座標のR軸(赤)とB軸(青)に近いが現実には存在しない仮想的な色の光を軸にとっている。一方YはG軸(緑)に近いが、光の明度に対応した軸になるよう設定してある<sup>\*41</sup>。RGBの場合と同様、明度を無視して色あいだけを考えると、合計が1になるように $X/(X+Y+Z), Y/(X+Y+Z), Z/(X+Y+Z)$ の3数値 $x, y, z$ に変換し、それを $xy$ 面に射影することで、二次元平面で扱う( $z$ は $1-x-y$ で計算できる)。これが $xy$ 色度図である(図18C)<sup>\*42</sup>。

$xy$ 色度図は色彩を定量的に議論するのに都合なので、色彩工学や色に関する各種規格で広く用いられている。しかし $x$ や $y$ の値から色を直感的にイメージするには不便なので、色管理に関するごく一部の領域を除いて、デザインや出版業の現場では普及していない<sup>\*43</sup>。

CIE表色系が人間に知覚可能なすべての色範囲〔色域、ギャマット(gamut)〕を表わせるのに対し、コンピューターのRGB色表現や印刷のCMYK色表現ではごくわずかな範囲の色しか表現することができない(図18D)。テレビモニターは赤緑青の3色の蛍光体の色を加算して色を表現す

るので、表現できる色の範囲(ギャマット)は各蛍光体の色度座標を結ぶ三角形の内側に限られる。また印刷で用いるCMYKの4色インクでは、表現できる色の範囲はさらに小さい<sup>\*44</sup>。たとえば抗体染色に用いる蛍光色素の鮮やかな緑は、印刷では再現できない。

#### I: 色盲と混同色線

光の3原色に基づいて色を規定しているXYZ表色系を使うと、色盲における色の見え方を定量的に扱うことができる。2色型色覚の人の大きな特徴は、3色型色覚の人には異なって見える様々な色が1つの同じ色に見えてしまうことである。たとえば第1色盲の人には、緑錐体と青錐体に入る光の刺激値が同じであれば、赤錐体を感じるべき光の量に関係なく同じ色に見える。これは色度図ではどのように表現できるのだろうか？

色盲の人にいろいろな色の参照光を見せて、それと同じ色を3原色を組み合わせで作ってもらおう。第1色盲の人ならば、赤の光を使わなくても緑と青の2色だけを組み合わせれば、同じ色に感じられる光を合成できる。このときの光の強さRとGを測り、換算式で値変換してCIE $xy$ 色度図にプロットすると、2色型色覚の人に同じ色に感じられる色は $xy$ 色度図で1直線に並ぶ。この線の上に並んだ色は、3色型色覚の人には異なった色に見えても、すべて2色型色覚の人には同じ色に混同して見えるのである。この線を混同色線(confusion line)という<sup>\*45</sup>。

$xy$ 色度図の上には無数の混同線が引ける。混同色線の数だけの色あいを、2色型色覚の人は見分けられるということである。 $xy$ 色度図では、赤と緑を結ぶ線に対し、青と黄色を結ぶ線がほぼ直行している(図18C)。これに対応して、混同色線の走り方は、赤緑色盲の第1色盲と第2色盲は赤-緑軸にほぼ並行(図19A, B)、青黄色盲の第3色盲はそれとほぼ直行して、青-黄軸にほぼ平行になる(図19C)。ただし混同色線はすべて平行ではなく、放射状に分布して色度図のほぼ1カ所まで互いに交わる。この点は第1色盲の場合は赤

\*41 人間の眼は緑に対する感度が高いので、見た目の明るさに対しては光の緑成分の寄与が大きく、赤や青成分の寄与は少ない(白黒写真を撮る際に緑のフィルターをつけると眼で見た感じとコントラストが近くなるのは、このためである)。したがって明度は、緑に対して赤と青のわずかな寄与を加えることで計算できる。Yはこの計算式に合うようにしてある。

\*42 明るさを含めた色を表わすときも、実用上はXYZ値を使うより、 $xy$ で色あいを現わしYで明度を現わす $xyY$ の3数値で現わす方が一般的である。

\*43 XYZ表色系の1つの欠点は、色度図上で色と色との間隔が人間の心理的感覚と一致しない点である。これを補正したのが1976年に定められたCIE 1976  $L^*a^*b^*$ 表色系で、 $L^*$ を $Y^{1/3}$ 、 $a^*$ を $X^{1/3}$ と $Y^{1/3}$ の差、 $b^*$ を $Y^{1/3}$ と $Z^{1/3}$ の差として変換する。これによって、 $L^*$ が知覚的な明るさ、 $a^*$ が緑-赤の色味の強さ、 $b^*$ が青-黄の色味の強さという比較的イメージしやすい量に対応するようになる。「Photoshop」は、内部的にはすべての色を $L^*a^*b^*$ 値で処理している。にもかかわらず色彩学や工業規格で一般的な $xyY$ で色指定ができないのは、たいへん残念である。

\*44 学術論文の電子データ投稿規定でCMYK形式のファイルがRGB形式より好まれるのはこの理由である。RGB値で指定した色を印刷するにはCMYK値に変換するが、印刷で再現できない色はどのように変換すれば著者の意図した色になるのか、印刷会社には予測できない。

\*45 混同色線の上の色は2色型色覚の人には見分けがつかないはずであるが、図19に示したような図では、たとえ混同色線の上に乗っている色でも色盲の人にもかなり見分けがつく場合が多く、混乱を招きやすい。図に塗ってある色は、あくまでイメージをつかむための目安に過ぎない。本来 $xy$ 色度図に示す色は明度Yが一定の色であるべきだが、図では色をわかりやすくするために明度を無視している(たとえば白色点は白で表わしてあるが、この図の明度ならば本来はグレーで表したほうが正しい)。さらに印刷の際の色変換のため、印刷された色は元来の指定とかなり異なってしまう。これらの理由により、色度図の混同色上にある色も、明度や彩度の差が生じて弁別できてしまうのである。

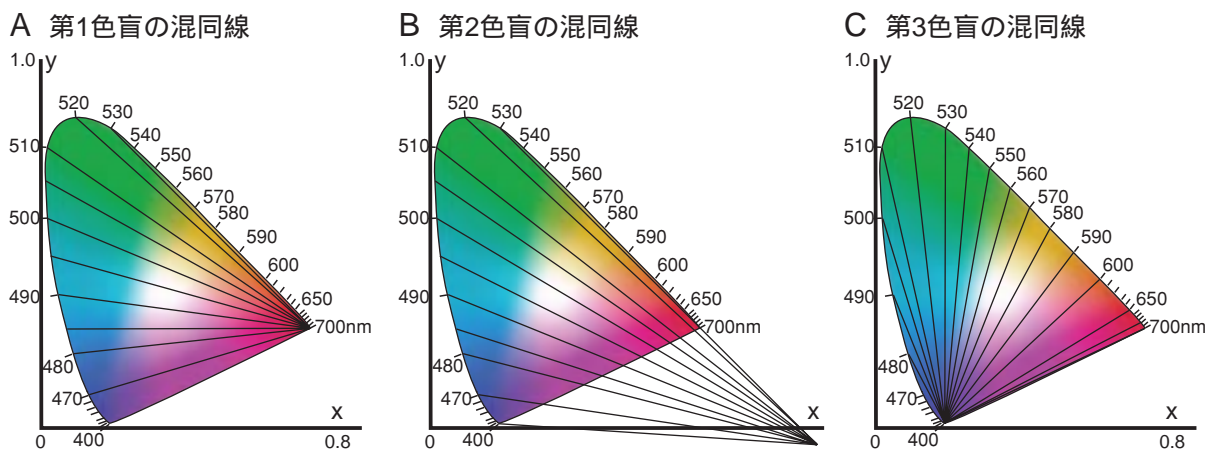


図 19. 色盲の混同線

第1, 第2, 第3色盲の人が混同する色(残った2種類の錐体からの出力が同じ割合になってしまっていて弁別できない仮性同色)は, xy色度図の直線上に並ぶ。

い単色光の付近, 第3色盲の場合は紫の単色光の付近になる。第2色盲の場合はスペクトルを離れた仮想状の色の点になる<sup>\*46</sup>。

混同色線を色度図の上の色の分布(図18C)と比較することで, どのような色が見分けにくいかを判断できる。たとえばxy色度図で緑は図の左上, 波長で500~540nmあたりに広がっている。この中で最も長波長の(黄みの強い暖色系の)緑は, 第1色盲と第2色盲の赤や黄色を通る混同色線の上に来てしまう。したがってこの辺りの色あいは赤や黄色と間違えやすい。またその少し短波長側の緑は, 茶色を通る混同色線の上に来るので茶色と間違えやすい。なるべく青みの強い緑にすることで, 他の色と混同しにくくすることができる。

さらに波長を短くすると緑と青緑の間に, 白を通る混同色線の上に来る点が存在する。この辺の波長は赤緑色盲の人には無彩色に見える。色盲の人に緑がグレーに見えることがあるのは(図4参照), この関係を反映している。

xy色度図を見ながら混同色線の上に乗らない色を探すことで, 色盲の人にも見間違いにくい色の組み合わせを選ぶことができる。たとえば色を間違えると即事故につながる信号機や自動車のランプ類, 道路標識などの色は, なるべく混同色線に乗らないようにxy色度図のどの範囲の色を使うかがJIS規格で厳密に定められている。

しかし第1, 第2色盲と第3色盲では混同色線がほぼ直行

しているため, すべての人に見分けやすい色を選ぶのは容易ではない。たとえば第1, 第2色盲では緑と青は遠く離れており, 弁別が非常に容易である(図19A, B)が, 第3色盲ではこれらの色は混同色線に乗ってしまい, 見分けるのは難しい(図19C)。単一の明るさに限られたxy色度図の平面内で色の割り振りを考える限り, すべての人への対応は困難である。したがって色覚バリアフリーは, 実は色の組み合わせを考えるだけでは実現不可能であり, 明度を変化させたり, 色でなく形の情報を組み合わせるなどの対策が不可欠である(本連載第3回参照)。また, 第1, 第2色盲は先天性色盲がほとんどであるが, 年齢に応じて頻度が急増する後天色盲のほとんどは, 第3色盲に近い症状を示す。したがって, 若年者が多い学校などでは第1, 第2色盲を, 高齢者が多い病院などでは第3色盲を中心にバリアフリーを考えるのも, 1つの方策であろう<sup>\*47</sup>。

## 2.7 色覚シミュレーションの原理とソフトの紹介

同じ絵や図版が自分と異なる色覚の持ち主にどのように見えるかを想像するのは簡単ではない! 「色がx×色に見える」というような色名を用いた説明は誤解を招きやすい。ある色名をどの範囲の色に対して用いるかは正常3色型色覚であっても人によって微妙に異なるし, ましてや異常3色型や2色型色覚の人ではその範囲にさらにずれがあることは2.2節Kで説明した。色名を絶対的概念であるかのよう

\*46 第1色盲と第3色盲の人から実測した混同線は一点に収束するが, 第2色盲の人の混同線は厳密には一点に収束しないという意見も多い。また先天性3色盲の人は数が大変少なく, 実測データが少ない。

\*47 大学の定年程度の年齢層までは, 加齢による色覚変化で大きな症状を示す人の率はまだ多くない。したがって学術関係のプレゼンテーションでは, どちらかと言えば第1, 第2色盲を優先した対策の方が効果大きい。



に扱って説明する限り、理解は勘違いを重ねたものになりかねない。

一番効果的なのは、色盲の人の見え方をシミュレーションして自分の眼で体験することであるが、色の見え方の変化は複雑で、サングラスのようなメガネをかける方法では再現することができない。

精度の低い近似ではあるが、ある程度第1色盲の雰囲気を味わうことができるのは、「Photoshop」などを使って、赤、緑、青チャンネルのうち赤チャンネルの表示を消してしまう方法である。これによって本来白であった部分にもかなりの色が付いてしまうが、その画面を長いこと見つめ、色順応によってそこが白に見えるように眼を慣らした状態が、第1色盲の場合の見え方にある程度似ている<sup>\*48</sup>。しかし第2色盲や第3色盲は、この方法ではシミュレートできない(2.6節A\*21参照)。

より厳密なシミュレーションを行うには、パソコンに取り込んだ画像のRGBの各成分を演算処理して、色盲の人が感じる値に変換するという複雑な処理が必要になる。色覚の厳密な定量的理解が未だ不十分である現状では正確なシミュレーションは非常に困難であるものの、かなり良い近似を示す変換式が発表されている<sup>10)~12)</sup>。

この方法では、まず画像の各ピクセル(画素)のR,G,Bの値を、ガンマ値にしたがってモニターテレビの画面上での物理的輝度に変換する(2.6節Aの\*22参照)。この値を工業規格の規定に従ってCIE表色系でのX,Y,Z値に変換する<sup>\*49</sup>。これをさらに赤緑青の3種の錐体細胞が受けるであろう刺激の量(3刺激値tristimulus)L,M,Sに変換する。第1色盲の人ではLに相当する赤錐体がないために、Lの値がいくつであっても赤錐体からの出力はゼロになってしまう。しかし正常3色型色覚の人が(L,M,S)の値に感じる色が、第1色盲ではL=0の(0,M,S)になってしまうわけではない。第1色盲の人でも白色光や475nmの青色光は正常3色型色覚と同じに見えるとされており、もちろん黒(0,0,0)は同じ黒に見える。これらの条件から連立方程式を解くと、第1色盲では $(L_{第1}, M_{第1}, S_{第1}) = (2.02344 M - 2.52581 S, M, S)$ となる<sup>\*50</sup>。同じようにMに相当する緑錐体がない第2色盲では $(L_{第2}, M_{第2}, S_{第2}) = (L, 0.494207L + 1.24827S, S)$ になる。この値に相当するXYZ値を計算し、規格にしたがってそれをモニター画面のR,G,B輝度に逆変換し、その輝度に

相当する画像データのR,G,Bの値を逆算すれば、変換は完了する。

この数式にしたがって画像を変換してくれるソフトも市販されている。「Colorfield Insight」(<http://www.colorfield.com/index.html>)ではMacintosh版Photoshopのプラグインが用意されている。「VisCheck」(<http://vischeck.com>)ではWindows版のPhotoshopと、Windows,Macintosh,LINUX版のNIH Imageに組み込むプラグインが用意されている(後者は無料)。これらを用いると、PhotoshopやNIH Imageなどのグラフィックソフトに任意の画像を読み込んで変換ボタンを押すだけで、それぞれのタイプの色盲での見え方をシミュレートしてくれる。また「VisCheck」のホームページ(<http://vischeck.com/runVischeck.php3>)では、自分のイメージファイルをアップロードするとシミュレーション結果を無料で作成して返送してくれるサービスも行っている。本稿でのシミュレーションの画像は、すべてこのVisCheckを用いて作成した。

このシミュレーションを解釈する際には、3つの注意が必要である。1つは、この方法は3種の錐体のうち1つの出力をゼロとした、完全な2色型色覚をシミュレートしているという点である。異常3色型色覚では、見え方はこのシミュレーションと正常3色型色覚との中間になる。

もう1つは、画像データのRGB値からXYZ色度値への変換は、特定の規格にしたがって厳密にキャリブレートされたモニターが前提になっているということである。ガンマ値やテレビ蛍光体の規格が異なる機材や、キャリブレートが不十分な機材を使った場合、色あいは変化してしまう。もちろんRGB値からCMYK値に変換して印刷すると、色は大きく変化する。

最後の点は、このシミュレーションは錐体の出力というレベルでの違いしか考慮に入れていない点である。2色型色覚の人は、ある程度の暗さであれば2種の錐体に加えてそれらとは極大吸収波長が異なる杆体からの出力を色認識に利用して、不完全ではあるが3色型色覚になっているという説もある。また2.2節Hに述べたように、赤緑色盲の人には色盲でない人よりも青を明るく感じる傾向がある。錐体細胞が2種類しかないことに対応して脳で調整されたこれらの後処理による影響は、シミュレーションには反映されていない。

\*48 パソコンのモニターや液晶プロジェクターの故障で、ときどき画面の赤チャンネルだけが表示されなくなってしまうことがあるが、これによって予期せず第1色盲を体験できることもある。

\*49 国際テレコミュニケーション連合(International Telecommunication Union;ITU)が、テレビの赤緑青の3原色や白色点がCIE xy色度図のどの座標点にくるべきかの規格を定めている。これらの値と赤緑青の輝度を掛け合わせるとXYZ空間での座標値が求められる。ただし放送用テレビやコンピューターのモニターには、これとは異なる規格も多数存在する。

\*50 これは、脳の色覚神経回路が残った緑錐体と青錐体の出力M,Sから赤錐体の出力に相当する成分を合成していると考えられる。

しかし各種の色盲の見え方をかなり高い精度で再現し、色盲でない人にイメージしてもらうことが可能になったという点で、これらのシミュレーションソフトは画期的である。これなくしては本連載のような企画は不可能であったと言ってもよい。自分が作成した画像をシミュレーションソフトで変換して、各種の色盲の状態でも必要な色が見分けられるようにデザインできていれば、それは2色型色覚だけでなく異常3色型色覚の人にも、また色盲でない正常3色型色覚の人にも、必ず色が見分けられるバリアフリーな画像が達成できているということになる。ぜひご活用いただきたい。

今回は、様々な色覚特性における色の見え方について紹介した。ふだん見ている色が万人に共通に同じように見えるわけではないこと、色名を使ってコミュニケーションすることが案外難しい問題を含む課題であることが、おわかりいただけたらどうか。次号では、このような状況に対して色盲の人の色覚特性を「矯正」したり「治療」したりするためになされてきた努力をまず紹介する。そしてそのような方向での解決が現実的でない状況において、実際にどのような点に配慮すれば色盲の人にも色盲でない人にも、色覚の特性にかかわらずわかりやすいプレゼンテーションをすることができるのか、そのために必要なポイントを順序立てて説明する。

謝辞 本稿を執筆するに当たり、東京慈恵会医科大学の北原健二、大城戸真喜子、滋賀医科大学の山出新一、宝仙学園短期大学の市原恭代、株式会社タムスの田中陽介の各氏から多大な御助言を頂きました。また国立遺伝学研究所の山尾文明、吉森保、池尾一穂、藤井智明、岡部内科の岡部悠の各氏からは貴重なコメントを頂きました。池尾一穂氏からは画像を提供していただきました。この場を借りて感謝申し上げます。

#### 文献

- 1) 市川一夫: 眼科臨床医報 (1980) 74: 859-962
- 2) 大庭紀雄: Practical Ophthalmology (2001) 4: 44-46
- 3) Nathans J, et al: Science (1989) 245: 831-838
- 4) Kohl S, et al: Nat Genet (1988) 19: 257-259
- 5) 太田安雄: Practical Ophthalmology (2001) 4: 60-61
- 6) 高橋現一郎: Practical Ophthalmology (2001) 4: 62-63
- 7) 工藤 仁: Practical Ophthalmology (2001) 4: 66-67
- 8) 仲泊 聡: Practical Ophthalmology (2001) 4: 68-70
- 9) 中塚和夫: Practical Ophthalmology (2001) 4: 71
- 10) Brettel H, et al: J Opt Soc Am A (1997) 14: 2647-2655
- 11) Vie'not F, et al: Nature (1995) 376: 127-128
- 12) Vie'not F, et al: Color Research and Application (1999) 24: 243-251

#### 著者プロフィール:

岡部正隆(第1色盲): 国立遺伝学研究所発生遺伝研究部門 助手, 総合研究大学院大学生命科学研究科 助手。

E-mail: maokabe@lab.nig.ac.jp

1993年東京慈恵会医科大学卒業, 1996年同大学院修了, 博士(医学)。科学技術振興事業団研究員(CREST代表 岡野栄之)を経て, 1997年より現職。

伊藤 啓(第1色盲): 東京大学分子細胞生物学研究所 助教授, 岡崎国立共同研究機構基礎生物学研究所 客員助教授。

E-mail: itokei@nibb.ac.jp

1986年東京大学理学部物理学科卒業, 1991年同理学系大学院修了, 理学博士。独マインツ大学客員研究員, ERATO山元行動進化プロジェクト研究員, 基礎生物学研究所助手を経て, 2002年より現職。

#### 「色覚の多様性と色覚バリアフリーなプレゼンテーション」

第1回(7月号) 色覚の原理と色盲のメカニズム

第2回(8月号) 色覚が変化すると、どのように色が見えるのか?

第3回(9月号) すべての人に見やすくするためには、どのように配慮すればよいか(仮題)