

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3回 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

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、インターネットの普及によって、論文や学会発表、ホームページなどでカラフルな色彩を用いた情報発信が誰でも容易にできるようになった。しかし読者や聴衆の色覚には、遺伝的背景の違いや、眼のレンズや視細胞などに障害を与える疾患によって、大きな個人差が存在する。色を使って重要な情報を伝えようとするときに、このような色覚の多様性のために情報が相手に正確に伝わらない危険があることは、十分に認識されているとは言えない。

第1回、第2回の連載を通じて、色覚がいかに多様であるか、色盲^{*1}の人がどのような色を見ているのか、さらに色覚の多様性がコミュニケーションをどのように難しくしているかについて紹介した。誰でも同じ色と同じように知覚しているのであれば、文字や記号と同じように色を絶対的な表現として情報伝達に用いることが可能であろう。しかし、すべての人が色を同じように知覚することができない以上、正確に情報を伝えるための絶対的な表現として任意の色を用いることは困難である。

一方、目の前の複数の情報を素早く見分けて互いに関連しているか異なっているかを一瞬に判断できる点では、色の塗り分けは極めて有効である。色盲の人と色盲でない人は、すべての色を異なって知覚しているわけではなく、同じ

ように判断できる色の組み合わせも多数存在する。誰にでも見分けやすい色の組み合わせを選び、さらに文字や記号、線の形状やハッチングなどの形態の差異を用いて色なしでも十分に理解できるようにプレゼンテーションを設計することで、色を用いた情報伝達のメリットを利用しつつ、色だけを用いた場合の情報伝達の失敗を防ぐことができる。

連載最終回では、まず色盲の「治療」や「矯正」がいかに困難で事実上不可能であるかを解説し、次に読者や聴衆の色覚が多様であることを前提とした色覚バリアフリーなプレゼンテーションの重要性と、その具体的な方法論を紹介する。

3.1 先天色盲を“治療”“矯正”する各種の方法

連載第1回に説明したように、先天色盲は染色体上のオプシン遺伝子の塩基配列で決定される色覚の表現型である。したがって先天色盲を治療するというのは、AB型の血液型をA型に変えるのと同じで、個人の体細胞の遺伝子を改変しない限り原理的に不可能である。しかし先天色盲の発生原理が解明される以前には、その治療を目指して様々な方法が試されてきた。原理がわかってからは先天色盲の根本治療そのものは医学の研究対象ではなくなったが、色の見え方を正常3色型色覚に近づけることで色盲の「症状」を和らげようとする対症療法の研究は、今も種々試みられている。

色盲の人が治療を願う動機には2種類ある。1つは、紅葉の赤と緑の対比など色盲の人には感じにくいカラフルな色

*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」などと言いか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回の注やホームページ<http://www.nig.ac.jp/labs/DevGen/mou.html>を参照されたい。

表1 色覚で制限を行っている民間企業の採用担当者へのアンケートから

色盲は色がまったくわからない	8 (72.7%)
色盲は運転免許が取れない	1 (9.1%)
特に明確な理由はない	2 (18.2%)
計11社	

長澤和弘ら：日本視能訓練士協会誌 (1999) 27: 263-269

彩を楽しみ、日常接する見分けにくい色の組み合わせを、より区別しやすくなりたい、という欲求である。もう1つの、より切実な欲求は、就職や資格試験、集団検診などに課されている色覚検査をパスしたいという欲求である。表1に示すように、色覚に対する無理解から、厳密な正常3色型色覚であることが職務に必ずしも必要でないにもかかわらず、安易に就職試験等で色覚検査を課している例は少なくない。また今年度まで全国の小学校で行われていた健康診断における色覚検査では、他の生徒の見ている前で石原表を読み上げさせるなどプライバシーへの配慮に欠ける場合もあり、色盲であることが他の生徒に知れ渡って、からかわれたり嫌がらせを受けたりするなどの精神的負担を被る例もあった^{*2}。

このように、日常生活では色覚に関してさほど不便を感じないにもかかわらず、色覚検査にパスしないことで将来の進路を閉ざされたり不要な精神的負担を感じたりせずに済むための自衛手段として、色覚検査に用いられる石原表さえ正常に読めれば、という願望は色盲の人の間に一定の割合で存在する。「あなたにも石原表が読めます」と宣伝する色盲治療法が少なくないのがその証左である。では、実際にどのような治療法が試されているのだろうか？

A：記憶力に頼る方法

まず挙げられる治療法は、「石原表を暗記する」という方法である。石原表の図柄はせいぜい数十種類であり、検査表は市販されている。自分の眼にそう見えるかどうかに関係なく、すべての図柄について正常3色型色覚の人に見えるべき文字や数字を答えられるように暗記するのは、努力すればさほど難しいことではない。これはもちろん、本質的には色盲の治療にはなっていない。しかし色盲の人が実社会で感じる不都合のかなりの部分が、色が見分けられないこと

でなく、色覚検査にパスしないことに起因している現実を考えると、この方法は実際的な効果が非常に大きい色盲の治療法なのである^{*3}。

色覚検査対策に限らず、記憶力は色覚を脳内で補正するのに大きく貢献している。色盲でない人でも、リングはどんな照明の下でも同じように赤く見える。我々が日常眼にする色のほとんどは、光源そのものの色ではなく物体から反射した表面色（物体色モード：連載第2回2.6節C）であり、脳にはその物体の特性や形状と知覚した色とが、必ず対になって記憶されている。このため人間は眼の前の物体が何であるかによって、その物体が持つべき色を記憶からイメージして、色覚を無意識のうちに補正する能力を備えている。

子どものころには木の幹と葉は同じ緑色だと認識していた色盲の人でも、「木の幹は緑色ではなく茶色である」と学んでしまえば、色盲でも感じられる幹と葉の色の違い（主に明度差や彩度差）に敏感になり、茶色として記憶している他の物体の表面色との共通点を強く意識することで、木の幹を茶色として認識できるようになる！茶色のパラはないはずだから、「これは赤」「これは桜の花だから水色ではなくピンク」「こんなに暗い黄色は存在しえないから、これは緑」のように、どの物体が何色であるべきかという知識や、どの色はどのような明度や彩度の範囲を持つかという知識が日常生活の中で積み重ねられることで、色を間違えることが年々少なくなる。色盲の人の中には「自分は子どものころ色盲だったが、いつの間にか治ってしまった」と感じている人もいるが、これは以上のような知識と経験の効果である。一方、知識や経験が通用しない初めて遭遇する物体や、物としての実体を持たない光源色^{*4}では、記憶から色名を判断することができないため、大人になっても子どものころと変わらず判断が難しい。

B：矯正メガネを利用する方法

近視や遠視と同様に色盲もメガネをかければ矯正できるのではないかという発想は19世紀から試されてきたが、サングラスのような単純な色ガラスではほとんど効果はなかった。ある程度の効果があったと言われているのは、次の

*2 連載第2回2.2節Kに述べたように、色盲の人には色名の同定が最も困難を感じる課題である。「ねえねえ、色盲だとこの色は何色に見えるの？」という質問は、足の不自由な人に「ねえねえ、ここまでジャンプできる？」と尋ねると同じであり、たとえ悪気がなくても、相手によっては精神的負担を感じさせる嫌がらせになることがある。

*3 例えば医師免許証の交付の条件には色覚による制限の条項はないが、多くの大学医学部では入学試験に色覚検査を課してきた（平成5年度以降はすべての国立大学で色覚による入学制限は廃止された）。顔色や臓器の色を見分ける必要がある臨床医学の分野では、色盲の人は症状を見逃す危険性があるので適性に欠けるという議論はあるが、基礎医学や社会医学など色盲であっても活躍できる医学の分野は少なくない。色覚検査によって一律に門前払いで進路が閉ざされるのを防ぐため、受験勉強の一部として石原表の暗記に励んできた受験生を笑うことは難しい。

*4 交通信号機では我々は光源色を判断している。青信号の光はCIE xy色度図上でかなり青みの強い緑と定義されているので見間違えることはないが、黄信号と赤信号の光は赤緑色盲の人には単独ではかなり識別困難である。しかし左から青、黄、赤と並んでいる車両用信号では、色盲の人でも黄色と赤を見間違えることはない。これは「黄色は中央」「赤は右」と、信号灯器と各ランプの位置関係を無意識のうちに記憶しているためである。一方小さな交差点に設置されている一灯点滅式信号機では、灯器とランプの位置関係を判断の参考にできないので、赤と黄色を間違えやすい。

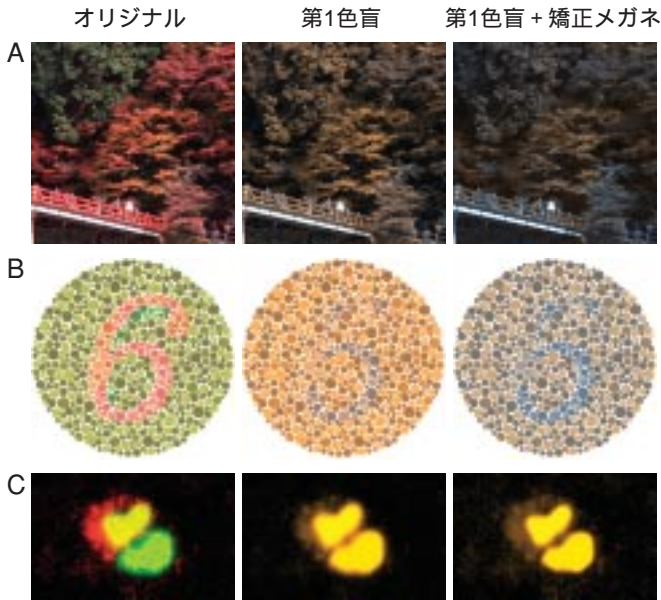


図1. 色盲矯正レンズの効果

A: 紅葉, B: 石原表, C: 蛍光二重染色. 左列: オリジナル画像, 中列: 色覚シミュレーションソフト「VisCheck」(連載第2回2.7節参照)で作成した第1色盲のシミュレーション, 右列: 緑をさえぎり, 赤をよく通す分光透過フィルターを用いた矯正メガネの効果シミュレーション, その結果を第1色盲でシミュレーション. 紅葉では赤が強調され, 石原表では色盲のシミュレーションでは5が読めたのが, オリジナル同様6が読めるようになっていく. しかし蛍光二重染色で黄色と緑の区別がつかない点は解決できない. また紅葉や石原表では, 多くの色が他の色に変化しており, 新たな仮性混同色を生んでいることがわかる. 色盲では認識できた5の文字が矯正メガネをすると読めなくなったということは, ある範囲の色に関してはかえって弁別能力が低下したということでもある. Bは(財)一新会より許可を得て, 石原総合色盲検査表(株)はんだや, 現在の製品名は石原色覚検査表(国際版)から転載. ただし複製のため色調が多少異なり, 色覚の判定には使えないので注意されたい.

ような方法である.

第1の方法は, 通称 X-chrom lens と呼ばれる赤いサングラスを片方(効き眼でないほう)の眼にだけ装着するというアメリカで開発された方法である^{*5}. 片眼だけ真っ赤なメガネをかけたのでは人相が悪くなってしまうので, 赤いコンタクトレンズを片眼に入れる場合が多い. 赤いフィルターは緑の光を通さないで, 緑は暗く見え, 緑と赤が容易に弁別できるようになる. また反対の眼にはフィルターを通さない光が入るので, 慣れれば左右の眼の赤(もしくは緑)錐体が受容する光の差を利用して, 色の弁別能力が向上するという.

この結果, 人によっては確かに一部の石原表が読めるようになるなどの効果があるらしい. しかし人によっては色を見分ける能力がかえって落ちることもあり, 効果がまったくない人のほうが多い. 何よりも左右の眼に写る景色が極端に異なるので, 両眼視には大きな支障が生じる.

単純な赤色でなく, 色覚特性にあわせて様々な色のレンズを選べるようにした, イギリスで開発されたクロマジエン(ChromaGen)もある. これは通常両眼に装着するが, 左右の眼に違う色のクロマジエンコンタクトを入れる場合もあり, この場合は X-chrom と同種の効果を狙うことになる.

特定の波長域の光だけを選択的に透過しにくくするフィルターをより積極的に利用した方法には, 中国で開発されたダルトンレンズがある^{*6}. 色盲の人は色相の弁別能力は劣るが, 明度の弁別に問題はないことを思い出して欲しい. 紅葉の森の緑の葉と赤の葉のように同程度の明るさで色相だけが違うものは, 色盲の人は上手に区別できない. しかし緑の波長域だけを吸収し, 赤をよく透過するようなフィルターを通して景色を見ると, 緑の葉は相対的に暗く, 赤の葉は明るく見えるようになる(図1A). これによって紅葉が鮮やかに見えるようになる. 同様に, 石原表で色盲の人に見分けられない図柄は, 明るさが同じで色相が異なる色を組み合わせられて作られているのだから, フィルターを通して各色の相対的な明るさを変えれば, 色盲の人にも見分けられるようになる(図1B).

これらの方法で, 色覚は本当に正常3色型に近づいたと言えるのだろうか? 答えは否である. 矯正メガネは, 色盲の人が見分けにくい(つまり仮性同色の関係にある)2つの色のうちの一方をフィルターを使って暗くすることで, 仮性同色の関係を崩して見分けられるようにしている. しかしこれによって, 同じ色相でより明るい別の色が相対的に暗く, 異なった色に見えるようになり, 新たに仮性同色の関係になってしまう(図1A, B). またサングラスをかけた場合と同様に視野全体が着色するので, 白い壁などは逆に不自然な色に見えることになる. このように色盲矯正メガネは色覚を治療できるわけではなく, 限定された特定の色範囲について, 従来区別しにくかった色を区別しやすいようにするだけである. 1つのメガネで区別できるようになる色はごく一部であり, それによって新たに区別できなくなる色の組み合わせも生じる. 錐体自体の波長特性は変わらないのだから, 全体としての色覚特性は, 2色型や異常3色型の

*5 X-chrom の商品そのものはすでに発売されておらず, 自分のコンタクトレンズを眼鏡屋さんで赤色に染めてもらって自作する. 本節で紹介する製品類は, 製造中止になっていたりして業者の連絡先を紹介しにくい. <http://www.google.co.jp> 等の検索サイトで, キーワードに製品名を入力して, 関連ホームページを探してみてください.

*6 ダルトンレンズは波長帯域ごとの透過率を厳密に制御しており, 緑を選択的に暗くするもの, 赤を選択的に暗くするもの, 赤と緑の両方を暗くするものなどが濃度を変えて種々用意され, その中から色覚特性にあわせて選択するようになっている(特許公報, http://zappa.amr.co.jp/altec/REDGREEN/dalton_patent.pdf を参照).

まま変わることはない*7。

矯正メガネで改善が期待しにくい状況の1つに、赤の光と緑の光が混合した色の弁別が挙げられる。例えば第1色盲では、光源色で緑色に赤成分を加えて黄色にしても、それに気付くことが難しい。矯正メガネをつけても緑に加わった赤成分の量が変化するだけであり、区別がしやすくなることはない。したがって、例えば赤と緑の蛍光二重染色で重なった部分が黄色になるのが弁別できないという状況を、矯正メガネで解決することはできない(図1C)。

C: 残像刺激や電気刺激を用いる方法

メガネやコンタクトレンズを利用した矯正に比べ、より“治療”に近い印象を与えるのが、残像刺激や電気刺激を用いた方法である。視覚回路には、例えば緑の図形を長く見続けてから白い壁を見ると赤い補色の残像が見えるように、刺激に応じて色への感受性を変化させる機能がある。この効果は、刺激がなくなってからもある程度の時間持続する。眼に特定の色の像を長時間見せたり、眼の周囲やこめかみなどに電極を貼り、微弱なパルス電流を加えて視神経を刺激したりすることで、脳の色覚神経回路の可塑性を誘引し、似たような効果を惹き起こす可能性が考えられる。それを長期にわたって続ければ、色の感じ方にある程度恒常的な影響を与えることもありえる。これを利用した治療法が種々開発されてきた^{1),2)}。

しかし、信号を出す錐体細胞の種類自体に変化はないのだから、2色型や異常3色型の色覚特性が変わることはないし、自分の眼からの入力刺激に適応して長年調整されてきた視覚処理回路の特性が、僅かな刺激で劇的に変化しても考えにくい。もともと弁別できる色の感じ具合を、多少変えたりできるだけである。このような治療の効果を正確に客観的に判定することは非常に難しいこともあり*8、結果としてこれらの治療法は一部の人には「効果」があったと主張する報告があるものの、他の多くの専門家はその信憑性を疑問視している*9。

D: 遺伝子治療の可能性

色盲の原因が網膜にある錐体細胞の種類の違いにある以上、色覚を本当に正常3色型に近づけるためには錐体細胞を入れ替えるしかない。遺伝子工学の発展により、このよ

うな治療に対する期待は高まっている。しかし2つの理由から、色盲の遺伝子治療は現実的ではないと考えざるをえない。

第1の理由は、色覚は単に錐体細胞の出力で決まるものではなく、脳の神経回路による複雑な処理を経て作られる感覚であるという点である。仮に網膜への錐体細胞の移植や、網膜にある既存の錐体細胞への遺伝子導入が可能だとしても、その細胞群がきちんと線維を伸ばし、そこからの出力を処理する神経回路が脳内できちんと形成されないと、正常3色型の色覚は得られない。2色型や異常3色型色覚の網膜からの出力に適応して形成されてきた色盲の人の視覚回路が成人になってからどの程度の変化に対応できるのかは、あまり楽観視できない。

第2の理由は、色盲の治療にはゲノムのどこかにオプシン遺伝子を導入すればよいわけではないという点である。網膜上には赤、緑、青の錐体がモザイク状に配列しており、個々の錐体はどれか1つのオプシン遺伝子だけを発現している。この発現制御がオプシン遺伝子座の構造に依存していることは明らかだが、その分子メカニズムはまだ解明されていない。したがって外来から導入する遺伝子を同じようにモザイク状に発現させるためには、X染色体上の1番目と2番目のオプシン遺伝子を正確に外来遺伝子で入れ替える必要がある。現在の技術では、これは組換えウィルスなどを使った成体への遺伝子導入では対応できず、ヒトES細胞を用いて試験管内で遺伝子改変した細胞を作製するしかない。第1の理由も考えあわせると、本人の網膜錐体細胞の遺伝子治療はきわめて困難であり、保因者の女性が子どもを作る際に自分の卵細胞に遺伝子導入して人工授精させ、子どもが色盲になるのを防ぐ、という対応にならざるをえない。

これは今の医療技術からすれば不可能ではないだろうが、たかが色盲を「治療する」のにこれほどの労力と医療コストを投入する意義があるのかという問題を、真剣に考える必要がある。コストをかけずに次世代に色盲の子どもを作らないようにするのであれば、保因者の女性が人工受精後に胚の遺伝子診断を行い、色盲変異を持たない胚のみに生きる権利を与えることも可能であろう。しかしながら一般的生活能力にまったく支障のない色盲の人が人間社会にかな

*7 ダルトンレンズと同種の効果を持つレンズがこの秋からセイコーエプソン社からも発売される。ただしこれも色盲の「治療」用ではなく、あくまでも「ある特定の環境下で特定の色の弁別が困難な人に対して、その特定の色の弁別を助ける」ためのものである。「これで色盲が治る」という誤解を避けるために、特定の医療機関で実際にその人に有用か否かを確かめ、十分な説明をしたうえで処方される予定である。なお健康保険は適用されない。

*8 効果の判定は多くの場合石原表が読めるようになるか否かで行われるが、長期間同じ色覚検査表を繰り返し見ると、答えを記憶したり、記憶に基づいて脳内で色を補正して見えないものが見えてきたりして、判定に影響してしまう。アノマロスコープを併用する場合でも、何回もテストを繰り返すと被験者は少し色味が違うところに調整することでわざと正常値を出すことが学習できてしまう。またアノマロスコープには、同じ被検者でも検査する人によって2色型と強度異常3色型の判定が振れてしまうことがあるという限界もある。

*9 この方法では機械を用いた施術を長期にわたって受けることが要求されるため、治療費や通院費の負担が非常に大きい。治療原理を神秘化し、効果を過大に宣伝する詐欺まがいの療法が存在したことなどもあって、この方法が色覚に与える効果の冷静な評価に混乱が生じているのは残念なことである。

りの頻度で存在している意義^{*10}について議論することもなく、このような優生学的な考え方を実行に移すのは、倫理上許されることではない。

3.2 色盲お助けグッズ

上記のような「治療」と呼ばれる方法を用いなくても、色の違いを弁別したり色名を同定したりする作業をある程度助けてくれる器具やソフトウェアが存在する。

A: 赤と緑のセロファンを用いた矯正メガネ

常時装着するのではなく、特に色の見分けが必要なときにだけ取り出して使えばよいのであれば、高価な赤緑色盲矯正メガネはまったく必要ない。数十円で買える赤と緑のセロファンを小さく切って財布に入れておき、赤や緑が見分けにくいときにそれを透かして対象を見ればよい。ステレオ写真に使う赤と緑の立体メガネは、この目的に便利である。赤のセロファンを通して見たときは赤系が明るく、緑系が黒くなり、緑のセロファンを通して見たときは赤系が

暗く、緑系が明るくなる。裸眼ではほとんど区別ができない黄色と黄緑も、黄色は赤のセロファンでも緑のセロファンでも明るさに差がないのに対し、黄緑は赤のセロファンでだけ暗く見えるので、容易に区別できるようになる。

B: バリアフリー蛍光顕微鏡 励起光バランスー

連載第2回2.2節Fでも述べたが、赤緑色盲の生物学者にとって赤と緑の蛍光二重染色の観察は非常に困難である^{*11}。特に赤と緑の蛍光を同時に観察するためのデュアルバンドフィルターを装着した蛍光顕微鏡を用いて肉眼で標本を観察しようとする、赤と緑が重なった黄色の部分と緑色単独に染まっている部分を見分けることができない。このため赤緑色盲の人が赤と緑の蛍光二重染色を観察するときは、単色用フィルターキューブで赤と緑を別々に観察することになる。だがフィルターキューブを交換する間に注目していた細胞を見失いやすく、同じ細胞が赤と緑に同時に染色されているのか、隣り合わせの細胞が赤と緑に別々に染まっているのかがなかなか判定できない。

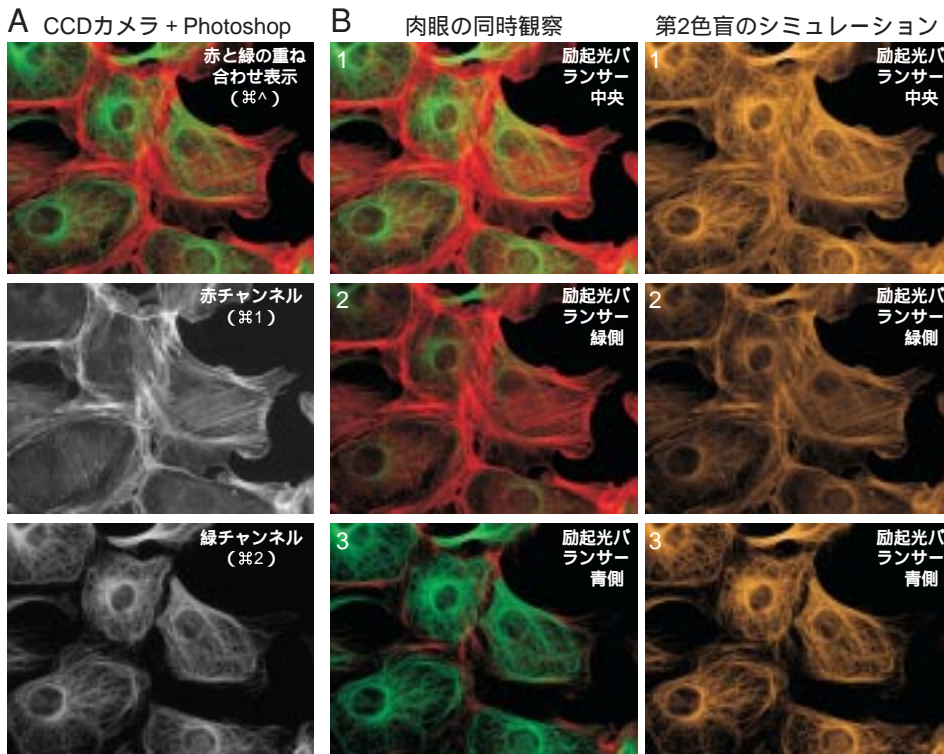


図2. 励起光バランスーを用いた画像

A: CCDカメラでチャンネルごとに撮影した画像をPhotoshopで合成。キーボードショートカットを利用して赤と緑の画像を素早く切り換えることで、色盲でも両チャンネルの画像を見分けられる。Bの1:デュアルバンドフィルターでは肉眼で2色を同時観察できるが、色盲の人には色が見分けられない(右のシミュレーション)。Bの2,3:励起光バランスーのレバーを操作すると、目で試料を見たまま赤と緑のシグナルの強度を変化させ、色盲の人でも見分けられるようになる。写真提供:オリンプス光学工業(株)。

*10 哺乳類の中で3色型色覚を獲得したのは我々霊長類の一部のみであり、ジャングルやサバンナや高山、極地の厳しい生活環境で遅く生活している野生哺乳類の大部分は、強度の赤緑色盲と同じ2色型色覚である。樹上生活をしてきた我々の祖先において、3色型色覚は赤い果実や黄緑色の若芽を緑色の葉の中から素早く見つけるのに有利だったと思われるが、他の哺乳類と同じ2色型色覚の個体が同じ環境の中で生活できなかったとは考えにくい。マカクザルではヒトよりも色盲の頻度は少ないが、発見された数少ない色盲ザルの1頭は群れのボスだったという(三上章允;私信)。連載第2回2.2節に述べたように赤緑色盲の人は、明度彩度や青みの差に3色型色覚の人より敏感な面もある。赤緑色盲の我々の祖先は果実や若芽を見つけるのは下手でも、草原のバッタや川の中の魚など同系色の明暗を用いた食料の探索は、色盲でない仲間より得意だった可能性がある。多様な食べ物を分担して集めることが社会性の成り立ちに役割を果たしていたとすると、色覚の多様性も人類の社会性の形成に貢献していたかもしれない。

*11 近年では、冷却CCDカメラや共焦点レーザー顕微鏡を用いて蛍光画像を直接デジタル情報として取得できるようになったため、蛍光顕微鏡像を肉眼で観察する機会は減ってしまった。デジタル画像では色盲の人にも見やすい組み合わせの疑似カラーを使うことで、色盲の人であっても蛍光二重染色を同時観察できる(3.4節参照)。しかしCCDカメラやテレビモニターの階調再現能力は、人間の眼よりはるかに低い。蛍光強度の微妙な変化や蛍光物質ごとの色合いを確かめるには、どんなにデジタル技術が進歩しても、接眼レンズを覗いて自分の眼で標本を観察するステップは欠かせない。

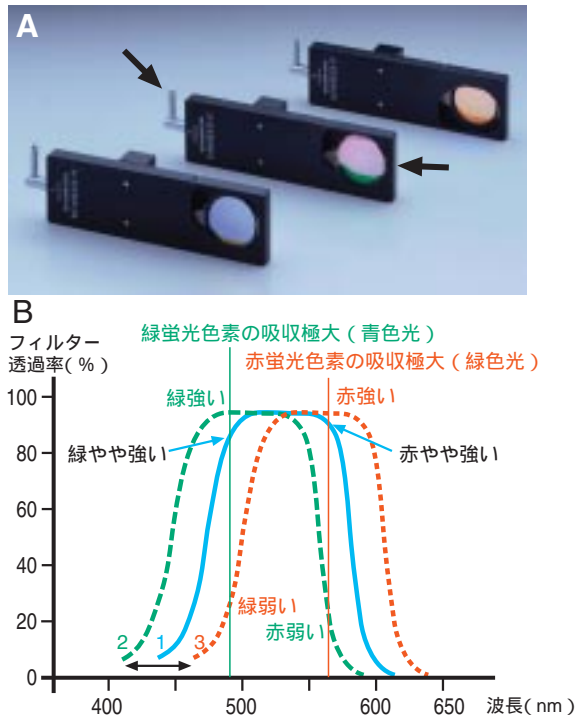


図3. 励起光バランスーの原理

励起光バランスーはレバー(Aの写真の左矢印)を操作すると干渉フィルター(右矢印)の角度が変わり、透過する波長帯が変化する。中間では赤と緑の蛍光色素が同じくらい励起され(Bのグラフの青い実線1)、短波長側にずらすと緑蛍光だけが(緑の点線2)、長波長側にずらすと赤蛍光だけが(赤の点線3)強く励起される。バランス可能な波長域が異なる製品が、他にも数種類ある。写真提供: オリンパス光学工業(株)。

Photoshop などを使って赤と緑の蛍光画像を見る場合、赤チャンネル(⌘1)と緑チャンネル(⌘2)をキーボードショートカットでパタパタと高速で切り換えることで、色覚に頼らなくてもシグナルの分布を比較することができる(図2A)。同じように顕微鏡でも 標本を見続けた状態で赤か緑どちらかの蛍光強度を素早く変化させられれば、どの部分がどちらの蛍光色素で染まっているかを確認できるはずである。

オリンパスの蛍光顕微鏡は、投光管の中に励起光バランスーと呼ばれるフィルターを挿入することが可能で、このフィルターの角度を変えることによって励起光強度が最大になる波長域を変化させることができる(図3A)。標本中の蛍光物質は、励起光の波長が吸収極大波長とよく一致していれば強い蛍光を発するが、波長がずれると弱くしか発光しない(図3B)。励起光バランスーはこの性質を利用して、2つの蛍光ラベルに極端な蛍光強度の差があった場合に、一方の光を弱めてバランスを取って観察できるように開発されたものである。しかしこの装置を使うと図2Bのように細胞から眼を離すことなく、レバーをパタパタと倒すだけで赤と緑の蛍光の強弱を素早く変化させることができる。これによって赤緑色盲の人でも細胞が赤と緑のどちらに染まってい

るのが容易にわかり、蛍光顕微鏡観察の色覚バリエーションに非常に優れた効果を発揮する。

C: コンピューターを用いた色の差の強調技術

コンピューターを使うと、矯正メガネや色セロファンでは不可能な複雑な演算処理を色情報に加えることができる。色盲の人に区別しにくい色相の差を区別しやすい明度や彩度の差にうまく置き換えられれば、色の弁別が楽になるかもしれない。このような技術はまだ発展段階の初期にあるが、1つの例が「ドルトナイザー」というソフトとして公開されている(<http://www.vischeck.com/daltonize/>)。現状では処理によって物体の明るさや色あいがどうしても大きく変化してしまうため、変換した絵を見るにはかなりの慣れが必要である。今後の発展に期待が持てるアプローチではあるが、矯正メガネと同様限られた状況下で限られた範囲の色を見分けるための、補助具以上のものだとは考えないほうがよいだろう。

D: 物体の色名を知らせてくれる機械

連載第2回2.2節Kで述べたように、色盲の人は色の弁別よりも色と色名の対応づけ(色の同定)のほうに、より大きな困難を感じる。通常の場合は、色名でコミュニケーションする必要に陥ることをなるべく避けるよう会話を導いたり、必要なら近くにいる色盲でない人に何色に見えるかを聞いたりすることで対処できるのであるが、どうしても自分で色名を調べたい場合もある。こういうときに便利なのが、目が見えない人に対して色を音声で伝えるために開発された携帯型色識別装置「カラートーク」(図4)である(http://www.hokkei.co.jp/c_1.html)。

この機械は、色を調べたいものを装置裏面の直径6mmの窓に押しつけると、内蔵の白色LEDで対象を照明し、反射光のRGB成分を測定して、測定値に相当する色名をJIS規格Z8102の「物体の色名」のJIS一般色名(系統色名)に従って音声で知らせてくれる。色名は、簡易モードで31通り、詳



図4. カラートーク

本体の裏側にある測定部を対象に押し当て測定ボタンを押すと、色を測定して色名を知らせてくれる。眼の見えない人が使うように設計されているため、音声案内だけで表示板は付いていない。写真提供:(株)北計工業。

細モードで220通り設定されている*12。

この機械は周囲の照明状況に関係なく高い精度で色を判別できる反面、機械自身が持つ光源と反射光との差を測定しているため、衣類や紙など測定窓に密着でき、直径6mm以上の面積を持つものでないと測色できない。照明が届かない遠くの物体や、光源の色や液体の透過光の色を測定することはできない。

E:画面の色名を知らせてくれるソフトウェア

インターネットからダウンロードした図版やデジタルカメラ(デジカメ)で撮影した写真など、電子画像のどの部分が何色なのかを見分けたいという需要も大きい。この目的に便利なのが、Macintosh用の「Xproof」(<http://www.colorfield.com/xproof/>)やWindows用の「色々の色」(<http://www.hikarun.com/w/>)など、マウスカーソルで指した画面の部分のRGB値を読み込み、対応する色名を表示してくれるソフトである。XproofはJIS一般色のアメリカ版に相当するNBS/ISCC色規格に、「色々の色」はマイクロソフト社のカラーパレットや、ホームページのHTML記述などに使われるX11カラーセット(<http://www.mcfedries.com/books/cightml/x11color.htm>)に準拠して色名を表示する。

物体をデジカメで撮影し、パソコン画面に表示してこれらのソフトを用いれば、カラートークでは対応できない小さなものや光源、遠くの物体の色名も調べることができる。ただし専用の照明を備えたカラートークによる測色と違い、デジカメではカラーバランスの調節を誤れば、いくらでも間違った色名を表示しうる。あくまで「目安」としての利用と考えたほうがよい。一方、PDFファイルに表示されたグラフの色や、ホームページに表示されたボタンの色などを調べるには、これらのソフトの有効性は高い。

F:機械による色名表示の限界

「カラートーク」にせよ「Xproof」や「色々の色」にせよ、RGBの分光比率から機械的に色名を割り出している。JIS一般色名やアメリカのNBS/ISCC規格ではすべての色に対して体系的に色名を付けられるようになっているが*12、その色名は「あざやかな明るい赤みの黄赤」のような、論理的ではあるが実用的とはいえないものになってしまう。JISでは「えんじ色」や「エメラルドグリーン」などより一般的な色名に対して、それに相当する代表的なマンセル値を列挙した「JIS慣用色名」も用意されている(<http://www>。

colordream.net/jiscolor1.htm)。しかしこれら普通の色名は、すべての色空間を体系的にカバーするようにはなっていない。人間であればカテゴリーの境界に当たるような微妙な色あいでも物体の材質や会話の流れに即して適切な色名を選ぶことができるが、これは機械には不可能である*13。

また人間は日常的に、同じ色に対して状況や文脈に応じて様々な色名を使い分けている。例えば「肌色」に対応するJIS一般色名は「うすい黄赤」で、一部の文房具会社のクレヨンでは「はだいろ」は「パールオレンジ」に置き換えられている。しかしだからといって「あなたの顔はオレンジ色です」と言ったら、相手は多分驚くだろう。人間なら当然できるこのような色名の使い分けは、機械には難しい。

さらに人間の脳は、眼に入るRGBの分光比率が太陽光と白熱灯など照明によって大きく異なる場合でも、それを補正して同一の色名を判定する能力を持つ。このような複雑精妙な色覚情報処理に関しては多くの研究者が活発な研究を行っている最中であり、わずかな手がかりが得られただけでも一流学術雑誌に論文が掲載される状況である。現状では色名同定のメカニズムが十分解明されているとは到底言い難い。我々生物学者はこのような状況をよく承知している以上、100年後はともかく少なくともここ数十年は、機械による色名表示に過大な期待をかけるわけにはいかないだろう。

3.3 色盲の人の側が対応するのに必要なコストと色覚バリアフリー化に必要なコスト

色盲は社会の少数派とはいえ、日本だけでも300万人以上、世界では2億人近い膨大な人々に見られる特性である。この特性を“正常”なものに変えるには膨大なコストがかかり倫理的にも問題がある遺伝子治療が必要で、メガネなど低コストの方法では本質的な効果は得られない*14。また高齢化社会の急速な進展に伴い、各種の後天色盲もますます増える傾向にある。他にも重要な医療課題が山積している今日、色盲の人の色の見え方を多数派の見え方に対応させるために多大な医療資源を投入することは、優先順位から見て得策ではない。

一方これら色盲の人が感じる不都合は、3色型色覚の人に区別できる色のうちの一部分がうまく区別できないという点と、色の名前がわかりにくいという点だけである。ほとんどの哺乳類が2色型色覚であることからわかるとおり、自然

*12 例えばJIS一般色では「赤、黄赤、黄、黄緑、緑、青緑、青、青紫、紫、赤紫」の10色と「白、灰色、黒」の3つの無彩色に、「赤みの、黄みの、緑みの、青みの、紫みの」という5種類の色相に関する修飾語と「ごくうすい、明るい灰みの、灰みの、暗い灰みの、ごく暗い、うすい、やわらかい、くすんだ、暗い、明るい、強い、こい、あざやかな」という明度、彩度に関わる修飾語を組み合わせ220通りの色を表現する。

*13 「色々の色」では色空間上での距離を機械的に計算して、最も近い色名を表示するようになっている。

*14 コンピューターを使って色の差を増幅する機械や色名を知らせる機械は一定の効果を示すが、手軽にリアルタイムで使えるとはいえない。プレゼンテーションやコミュニケーションに色を用いるのは、伝えたい内容を瞬間的に把握しやすくするためなのだから、学会の口演やポスター発表にいちいち機械を持ち歩き、時間をかけて色を測定しなくてはならないのでは本末転倒になってしまう。

の中で我々が生きていくに当たっては、色盲であることはハンディキャップにはならない。ましてや人類が狩猟採集生活を脱し、ほとんどの食品をスーパーなどで購入するようになった現代社会では、自然界の色が見分けられないことで色盲の人が本当に困るような状況は非常に少ない。実際のところ色盲の人が感じる不都合の大半は、表示や掲示、本や雑誌やホームページなど、他の人が作った人工物の色がうまく見分けられないことに起因する。自然に存在する色は人間が変えることはできないが、人間が人為的に決めた色遣いは、より見分けやすいように自由に変わることができる。しかもそのためには、図版や掲示物を作成する際に配色やデザインにわずかな配慮をするだけでよく、それに必要な社会的コストはゼロに近い^{*15}。

中でも科学者や教師のように論文や学会発表や授業で自分が伝えるメッセージを相手にきちんと理解してもらうことが死活的に重要な職業においては、読者や聴衆や生徒の中に確実に存在する色盲の人たちにわかりやすいよう配慮することは特に大切である^{*16}。では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、色覚の特性に関わらずわかりやすいバリアフリーなプレゼンテーションにすることができるのだろうか？ 次節からは、「顕微鏡写真などの画像」、「グラフなどの図版」、「スライドやポスター、ホームページ」、「学会発表や講義、授業」の順に、配慮が期待されるポイントを説明していきたい。

3.4 蛍光染色画像やDNAアレイの画像などデジタル情報の表示

つい数年前までは、多色の染色標本を撮影するにはカラーフィルムを用いるしかなく、自分でカラー現像する設備を持っているのでないかぎり、画像の色を変えるなどということはできない相談であった。しかし最近急速に画像処理のデジタル化が進み、共焦点レーザー顕微鏡やCCD

カメラで標本を撮影し、手元のコンピューターで自在に色を操れるようになった。このことは標本の元来の色にかかわらず、工夫次第で見やすい色遣いを選べるようになったということである。

A:1チャンネルの蛍光画像は白黒のグレースケールで

1種類の蛍光色素でラベルした標本には、単色の画像情報しか含まれていない。しかしFITCやGFPの単一ラベルを緑のカラー写真で掲示したり、RhodamineやDsRedのラベルを赤のカラー写真で掲示したりしているポスターや論文は、非常にしばしば見られる。このような写真では、色は撮影に使った波長を示すだけの意味しかない。それを白黒でなくカラーで掲示した場合、実は2つのデメリットがある。

第1のデメリットは、単色のカラー蛍光写真は色覚のタイプによっては非常に見にくいという点である。黒背景における赤の画像は、長波長領域の光を認識できない第1色盲の人にはほとんど見えないし、青の画像は色盲でない人にも暗く見にくい(図5)。

第2のデメリットは、蛍光ラベルの赤、緑、青の色は印刷すると階調が飛んでしまうという点である。テレビモニターではこれらの色は鮮やかに表示されるが、論文の印刷ではこれら光の3原色は単独のインクではなく、赤はマゼンタと黄色、緑は黄色とシアン、青はシアンとマゼンタという混ぜ合わせで表現される。混ぜ合わせたインクでは、彩度が高く明るい鮮やかな色はどうしても再現できない(図16C)。特に緑においてはその限界が著しい。結果として白黒に比べカラーの単色写真では、明るい部分や暗い部分が大きく潰れてしまう(図6, 18)。白黒なら90%と100%でも十分にシグナル強度の差を再現できるが、緑では60%程度ですでにシグナルが飽和してしまい、100%との差がわからなくなる。染色の強度分布をなるべく正確に伝えたい学術写真では、この欠陥は致命的である。

以上から、単色の写真画像は見栄えはよいが表現精度に劣るカラーでなく、白黒のグレースケールで掲示するのが、すべての人に見やすく、明暗の情報

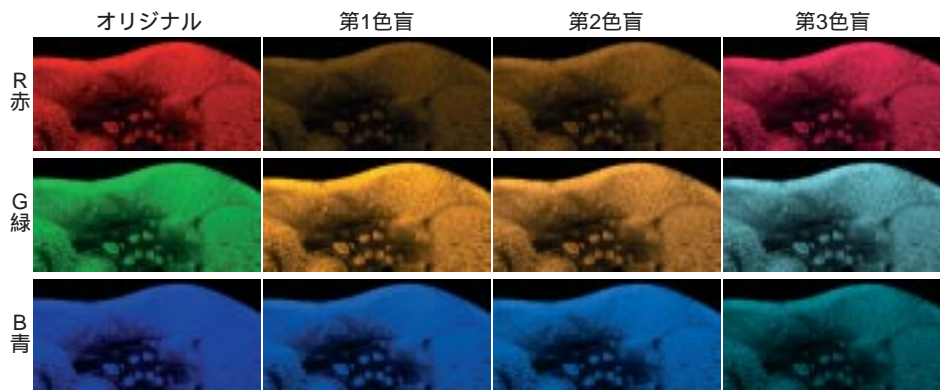


図5. 単染色のカラー表示

1チャンネルの単色(モノクローム)画像を赤(R),緑(G),青(B)で印刷した状態のシミュレーション。第1色盲では赤い画像はほとんど見えない。写真提供:白木岐奈,林 茂生。

*15 案内や掲示物を新たに貼り替えるのにはコストがかかるが、定期的なリニューアルの際に対応するのであれば余計なコストはかからない。

*16 論文のレフェリーをつとめる学界の権威に対して色盲の治療を要求するよりも、色盲の人にも見やすいよう配慮した論文を投稿するほうがはるかに楽である。

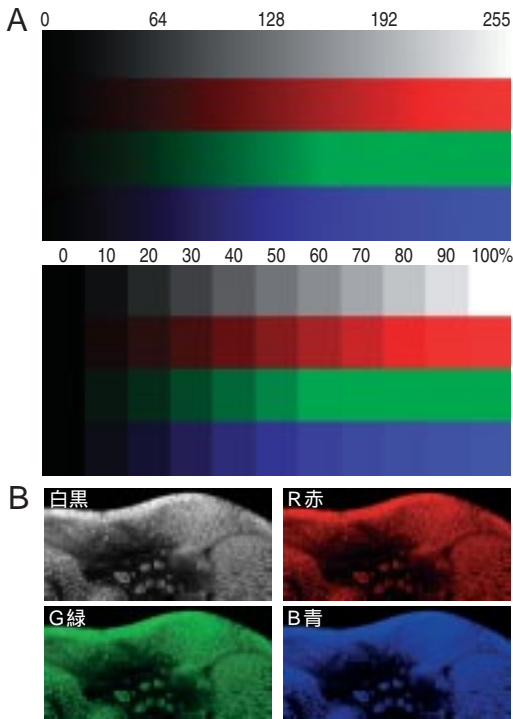


図6. カラー単色写真の階調表現

A: RGBモードで作成した, R,G,Bの各値を0から255(100%)まで変化した画像を, CMYKモードに変換して印刷. 白黒グレースケールではすべての階調が滑らかに再現できているが, カラー画像では階調再現性が悪く, 特に緑では明るい鮮やかな部分がほとんどつぶれ, 暗く印刷されてしまっている. B: 図5と同じ写真. 白黒では微妙な部分の階調がきれいに再現されているが, 各カラーの写真ではつぶれてよく見えない部分が多い.

を精度良く正確に伝えられるので最善である. 撮影に使った波長は写真のカラーで示すのではなく図版説明 (figure legend) の記述だけでさりげなく示すようにしたほうがよい^{*17}.

B: 2チャンネルの蛍光画像は, 赤と緑でなくマゼンタ(赤紫)と緑の組み合わせで

蛍光二重染色やDNAアレイ(マイクロアレイ)など2つのチャンネルの情報を重ね合わせて掲示する場合, これまでは一般的な蛍光色素の色にあわせて, 各チャンネルの情報を「赤と緑」で表現することが慣例となっていた. 赤と緑が重なった部分は黄色で表示される(図7A). しかしシミュレーション画像(図7B)でもわかるように, 赤緑色盲の人には黄色と緑の部分がほとんど区別できない. さらに第1色盲では赤の部分も暗くなる. 顕微鏡写真では, どの部分で2つの蛍光ラベルが重なっているのかわからないし, DNA

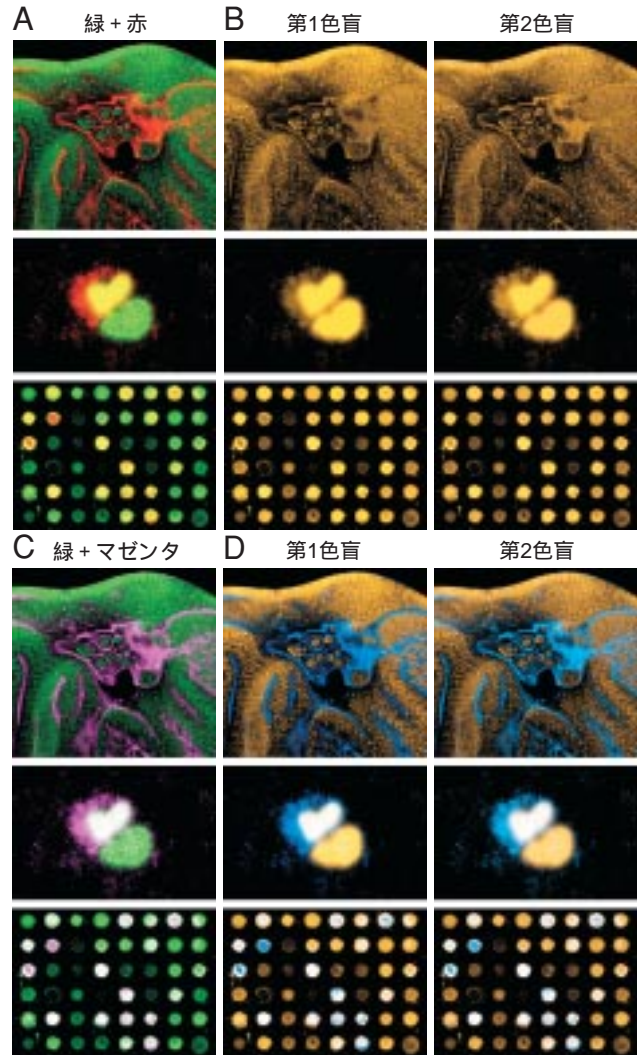


図7. 二重染色の表示法

A: 2チャンネルの蛍光顕微鏡(上), 隣接する2つの細胞(中), DNAアレイ(下)の各写真を赤と緑で表示. B: 第1色盲や第2色盲では, 黄色と緑がほとんど区別できない. 第1色盲では赤も暗い. C: 赤をマゼンタに変更. D: 青を加えたことで, 色盲でも問題なく色を見分けられる. 写真提供: 白木岐奈, 林 茂生, 池尾一穂.

アレイではどこで発現変化が見られたのかわからない.

これらの問題を解決するには, 赤の代わりにマゼンタ(赤紫)を用いた「マゼンタと緑」の組み合わせを用いると絶大な効果を発揮する(図7C)^{*18}. これだと色盲の人でも, 2つのチャンネルのシグナル分布をよく理解できる(図7D). CCDカメラや共焦点レーザー顕微鏡など蛍光撮影装置の多くがデジタル化し, 各チャンネルの色を自由に選べるようになった現代では, 使用した蛍光色素の色にこだわる必要

*17 標本の元来の色を忠実に再現するという点でも, これらの写真を赤や緑で色づけすることに意義は乏しい. 蛍光色素の色とテレビモニターの蛍光体の色は決して同じではなく, 蛍光色素の色もそれぞれ微妙に色合いが異なる. カラーフィルムやカラーCCDで撮影した画像をそのまま掲載するならともかく, 共焦点顕微鏡やモノクロCCDで撮影した単色の画像データをRGBの赤や緑のチャンネルに割り振っただけの写真では, 科学的に意味のある色再現とは言えない.

*18 緑に対比させる色として赤の代わりに青を使えば, 赤緑色盲の人にはとても見やすいのだが, 色盲でない人は青の感度が色盲の人より低いので, 逆に青チャンネルの画像が暗く, 見にくく感じられてしまう. 赤と青を等量混ぜ合わせたマゼンタ(赤紫)を使うことで, 色盲の人は緑と青の, 色盲でない人は緑と赤の対比を感じることができ, 双方に見やすくなるのである.

表2 市販の顕微鏡におけるマゼンタ疑似カラーの設定

オリンパスの共焦点レーザ走査型顕微鏡：

Fluoview application software Ver.4.2以降では、出荷時から疑似カラーにマゼンタが登録されている。疑似カラーを付ける「ディスプレイ」パネルを前面に表示し、画面左下のツールバーの<LUT> ボタン*をクリックして「Color Tool」ウィンドウを表示させる。<Ch1> ~ <Ch5> から疑似カラーをつけるチャンネルを指定し、「Standard Color LUTs」グループボックスからマゼンタのボタンを選択する。カールツァイスのデジタルカメラと共焦点レーザースキャン顕微鏡：

デジタルカメラ AxioCamの制御ソフト Axiovision でも、出荷時からマゼンタの疑似カラーが登録されている。画像取得時に表示されるウィンドウ上の疑似カラーの表示部をクリックするとカラーパレットが表示されるので、そこからマゼンタを選択する。共焦点レーザースキャン顕微鏡 LSM510 および LSM5 Pascal では、最大 24 色の疑似カラーを作成・保存できる。「Configuration Control」ウィンドウにおいて各<Ch-> ボタンをクリックすると、登録されている疑似カラーが表示される。<Define> ボタンをクリックすると、さらに編集パネルが表示される。色の指定はカラーパレット上でマーカーを移動させるか、HLS 色表現が RGB 値を入力する。マゼンタを設定する場合は、RGB 値を 255,0,255 と入力すればよい。作成した疑似カラーは、次回からのデフォルトとして使用することができる。画像の表示ウィンドウで各チャンネルの疑似カラーを設定するには、画像右側「Select」の最上段にある<Chan> をクリックして各チャンネルのボタンが並んだ「Channels」を表示させる。最下部にある<Colors> をクリックし、RGB に 255,0,255 と入力し、<Add> ボタンを押すと、疑似カラーリストにマゼンタが追加される。次いで各チャンネルのボタンをクリックし、ポップアップからマゼンタを選択する。

ニコンの蛍光顕微鏡と蛍光レーザ顕微鏡システム：

ニコンと浜松ホトニクスが共同開発した画像解析ソフト EG-Lab では疑似カラーとしてマゼンタが登録されている。撮影したグレースケール画像のウィンドウを選択した状態で、疑似カラーのアイコンをクリックすると文字で表示されたカラーウィンドウが表示されるので、マゼンタを選択する。蛍光レーザ顕微鏡 C1 用ソフトウェア EZ-C1 では、「View settings」ウィンドウにおいて、赤と青の 2 色を同一チャンネルに指定することによって、マゼンタにできる。マゼンタと緑の画像を書き出すには、<File> メニューより<Save As> を選択して、TIFF、BMP 形式で画像を保存する。

パイオラッドの共焦点レーザースキャン蛍光顕微鏡：

出荷時からマゼンタの疑似カラーが登録されている。メニューバーの<Method> をドラッグし<Edit> を選択すると、「Methods」のウィンドウが表示される。「Double Green/Red」を選択し、ウィンドウ上部の<Edit Method> ボタンを押すと、「Double Green/Red-Method wizard」のウィンドウが表示される。ファイル名を「Double Green/Magenta」に変更し、<NEXT> ボタンを 4 回押すと、「Look up Tables names」がウィンドウ内に表示される。その中から「Magenta.lut」をドラッグし、現在「Red.lut」が設定されている Panel にドロップする。同様に Pane3 の「Red.lut」にもドロップし、<NEXT>、<FINISH> で設定が完了する。

ライカの共焦点レーザ顕微鏡（共焦点イメージングスペクトルフォトメーター）および蛍光顕微鏡：

共焦点レーザ顕微鏡には出荷時より疑似カラーとしてマゼンタの登録がある。「Acquisition」メニューにおいて<Beam> ボタンをクリックすると、各チャンネルの疑似カラーが表示される。目的のチャンネルの疑似カラー表示部分をクリックすると、別ウィンドウで疑似カラーの一覧が表示されるので、マゼンタを選択し<OK> ボタンを押す。

電動蛍光顕微鏡と CCD カメラを組み合わせた蛍光イメージングワークステーション FW4000 でも、マゼンタが出荷時から設定されている。<Setup> ボタンをクリックし、< > ボタンをクリックすると蛍光色素設定画面が表示される。各チャンネルの左側に表示されている現在の疑似カラーをダブルクリックするとカラーパレットが開くので、マゼンタを選択し<OK> をクリックする。色名が表示されないのでもカラーパレットの中でどれがマゼンタかわからない場合は、RGB を 255, 0, 255 と入力すればマゼンタになる。疑似カラーの表示がマゼンタに変わり、<OK> をクリックして完了する。この設定は保存できる。

* Look Up Table の略で、グレースケールの画像をどのような色で表示するかを画像処理ソフトが参照 (Look Up) するための表 (Table)。

はない。元々の色に関係なく、読者や聴衆に一番区別しやすい色を選んで掲示すべきである*19。この点からも 2 チャンネルの蛍光画像には、ぜひマゼンタと緑の組み合わせを使っていただきたい*20。

TIFF や PICT、BMP 形式などで保存された既存の「赤緑」画像を「マゼンタ緑」画像へ変換するのは、非常に簡単である。RGB 表示における赤チャンネルの絵を青チャンネルにコピーするだけでよい (図 8)。Photoshop の場合、「赤チャンネルだけを表示 (⌘1) すべてを選択 (⌘A) コピー (⌘C) 青チャンネルだけを表示 (⌘3) ペースト (⌘V) 全チャンネルを表示 (⌘^)」という一連の操作 (Macintosh は ⌘ コマンド) キー、Windows は CTRL キー

を押しながら 1AC3V^ と叩く) で、わずか数秒で変換することができる。

C：各社の顕微鏡の疑似カラー表示をマゼンタと緑に設定する方法

色盲の人にとっては、観察を始める段階で各チャンネルの疑似カラーをマゼンタと緑に初期設定しておくほうが便利であるし、普段疑似カラーをつけた画像を保存しているユーザーも、Photoshop でなく顕微鏡付属のソフトで色を変換するほうが便利な場合もある。そこで主な共焦点レーザ顕微鏡やデジタル画像処理が可能な蛍光顕微鏡のソフトウェアを使って、疑似カラーにマゼンタを選択する方法を表 2 に紹介する (会社名の 50 音順)。

* 19 最近では CFP や YFP など単純に RGB の各チャンネルに当てはめにくい色の蛍光を発する色素を用いた多重染色も頻繁に行われるようになり、元々の蛍光に近い色を疑似カラーに用いるとその後の画像処理で不便が生じることも増えてきた。

* 20 なお前節で説明したように、カラーの図版は階調再現性が白黒よりも著しく落ちる。論文では誌面のスペースが許す限り、2 チャンネルのマゼンタ緑の重ね合わせ画像だけでなくチャンネルごとのグレースケール画像も並べて掲示すると、さらにわかりやすく、情報もより正確に伝わる。

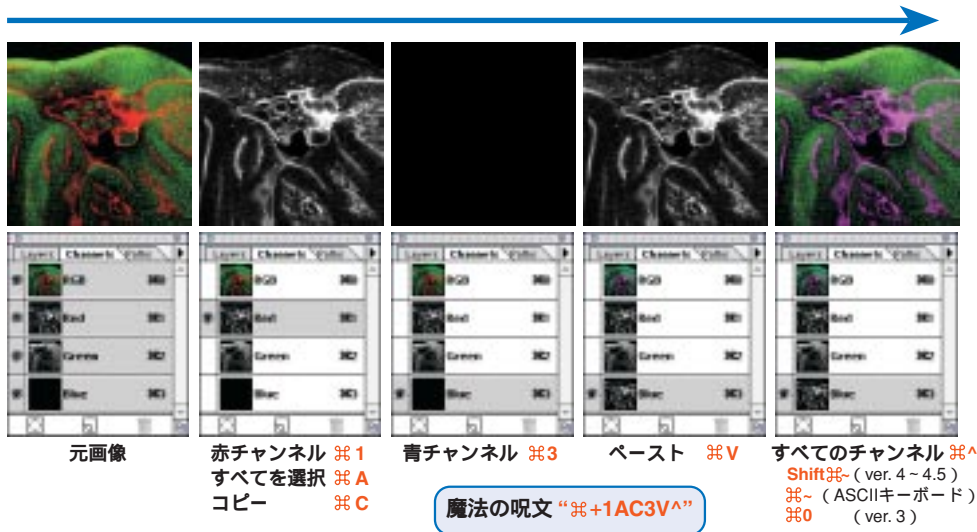
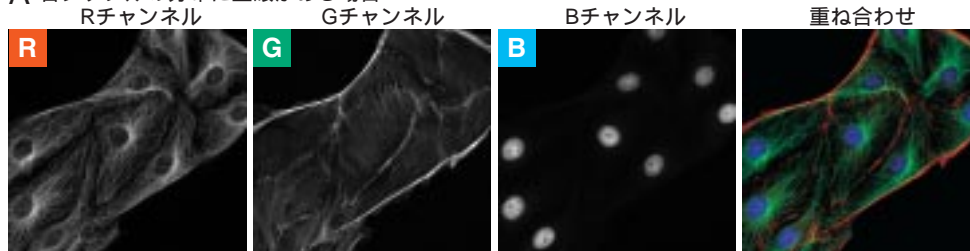


図8. 緑赤から緑マゼンタへの Photoshop での変換

画面の表示とチャンネルパレットの表示. Macintosh の場合, Photoshop バージョン6と7では最後の「すべてのチャンネルを表示」のショートカットがJIS配列のキーボードでは(☞^)だが, ASCII配列では(SHIFT+☞+)になる. バージョン4~5.5ではJIS配列では(SHIFT+☞+), ASCII配列では(☞)になる. バージョン3では(☞0)となる. Windowsではバージョン6と7では(CTRL+^), バージョン5~5.5では(SHIFT+CTRL+)で, バージョン4ではショートカットが使えない.

A 各シグナルの分布に主眼がある場合



B シグナル間の共存関係に主眼がある場合



図9. 三重染色の表示法

A: 各チャンネルの白黒画像と, 重ね合わせ画像を並べるやり方. B: 2チャンネルずつの組み合わせ(重要なだけでもよい)をマゼンタ緑で表示し, 全チャンネルの重ね合わせと並べるやり方. 写真提供: オリパス光学工業(株).

D: 3チャンネル以上の画像は, 赤緑青などの組み合わせ写真に加え, 各チャンネルの白黒グレースケール画像が, 数種類の「マゼンタと緑」を並べて表示

蛍光三重染色で3チャンネルの画像を掲示する場合, 赤緑青の各チャンネルの色に加え, そのうち2色が重なった部分(赤と緑で黄色, 赤と青で紫, 緑と青で水色), さらに3色が重なった部分(白色)の7色を見分ける必要がある. これは色盲でない人にも本来は無理な話であり, 3チャンネル画像は一見カラフルで情報豊富に見えるが, 見る人に正確に伝えられる情報は実際にはむしろ少ない. 4チャンネル, 5チャンネルの多色画像ではなおさらである.

全体像を示すため, 全チャンネルの組み合わせ写真は当然必要であろうが, 赤緑色盲の人にはそのうち赤と緑の画

像は見分けがつかない. ぜひチャンネルごとの写真を, 別に並べて掲示していただきたい.

その場合には2種類の考え方がある. 各チャンネルの画像のパターンの違いに興味がある場合や, 各シグナルの強度分布を忠実に掲示したい場合には, 組み合わせ写真に加えて各チャンネルの白黒グレースケール画像を別に示すと効果的である(図9A)^{*21}. 一方特定の2つのチャンネルのシグナルの分布関係に特に興味がある場合(例えばタンパク質AとBの局在の相関と, AとCの局在の相関を知りたい場合)には, 全体の組み合わせ写真に加えてAとB, AとCの2つの組み合わせについて, マゼンタと緑の組み合わせで2チャンネル画像を掲示するほうが効果的である.

培養細胞の蛍光三重染色では, 赤と緑で注目している2種

*21 各チャンネルの写真をカラーでなく白黒で並べると, 組み合わせ画像においてどれがどの色に対応するかを説明する手間が余計にかかり, 特に時間が限られた口頭発表ではむしろ不便だという意見がある. しかし図9Aに示したように画像の余白や上下などに四角や丸を描き, 組み合わせ画像での色を塗って示しておけば, 色の対応も説明なしで素早くわかるようにできる. 色のついた文字で示す人もいるが, この図のように色面積を大きくしたほうが見やすい.

類のタンパク質をそれぞれ染め出し、さらに核を青で揭示しているものが多い。実際に重要なのは赤と緑で示している抗原の極在の相関なのだから、この2つだけをマゼンタと緑で示し、細胞の位置を示すために各抗原と核染色のマゼンタ緑画像を別に示すとよい(図9B)*²²。これによって発表者が最も正確に伝えたい情報をすべての人にわかりやすく示すことができる。

E: 蛍光以外の標本の場合

蛍光ラベルでない組織化学的な染色でも、色盲の人に一部の色が見づらいのは事実である。しかしシグナルの強弱の情報だけしか存在しない蛍光標本に比べ、明視野やノマルスキー検鏡法で観察する染色標本では組織の輪郭や形態など様々な情報を色情報に加えて利用できるため、色盲の人が感じるハンディキャップはそれほど大きくはない*²³。蛍光標本と異なり組織化学染色の標本では、情報がRGBの各チャンネルに明確に分離しているわけではないので、CCDカメラで取得した画像の色をコンピューターで変換処理するにも限界がある。この点も考えると、蛍光以外の標本においては、図版の作成に当たって色覚パリアフリー化のために配慮すべき点は特にない。

F: 図版説明における注意

図版説明 (figure legend) の作成に当たっては、配慮が必要な点が1つある。組織化学染色の色や濃淡の差は色盲の人にも弁別できるとは言っても、どこが何色に染まっているかという色名の同定に関しては、色盲の人には大きなハンディがある。「赤く染まった細胞が、茶色が××」のように色だけで対象を指定して説明すると、それがどこを示しているのか相手に伝わらないことが多い。図版に矢印などを加え、「太い矢印で示した赤い大きな丸い細胞が、細い白抜き矢印で示した茶色の小さい細胞が××」のように、色と重複させて記号や形態描写で対象を指定すると、非常にわかりやすくなる。

3.5 グラフや概念図(スキーム)などの図版

標本自体が持つ色や明暗をもとに作成しないとならない写真画像に比べ、グラフや概念図(スキーム, schema)では図版作成者がゼロから自由に色を選ぶことができる。この

ため、配慮次第で非常にわかりやすい図版を作ることができる反面、失敗すると色盲の人にわからないどころか、色盲でない人にもわかりにくい図版になってしまうこともある。そのために配慮すべき点としては、

- ・ 明度や形状の差、文字情報などを併用し、色に頼らなくても情報が得られるようにする、
- ・ わかりやすい色の組み合わせを選ぶ、

の2つのポイントが挙げられる。本節ではまず最初のポイントについて詳しく説明する。

A: 区別が必要な情報を、色情報だけで識別させないのが大原則

最も大切なことは、そもそも読者や聴衆に区別が必要な情報を色だけに頼って識別することを強制しないことである。「色なしでも理解できるようにデザインし、その上で強調のために副次的に色を添える」という工業デザインの黄金律は、学術論文の図版にもそのまま適用できる。色彩光学の立場からは、図版の色を支障なく瞬時に識別できるのは、色盲でない人でも4色から、せいぜい6色までだと言われている。東京の地下鉄路線図のように13色もの色で塗り分けられた線は、色盲でない人でも非常に見分けにくい。色だけに頼らず、色以外の情報を必ず付加することで、色盲の人にも判別でき、色盲でない人にもさらにわかりやすい図版を作ることができる。このように色とそれ以外の要素を組み合わせることを、情報を「冗長的に (redundant)」表現すると言う。

アップルコンピューター社の「ヒューマン・インターフェース・ガイドライン」という冊子は、ほとんどのパソコンが8色や256色しか扱えなかった時代から、色遣いに関する行き届いた配慮を体系化して提示している*²⁴。中には色盲の人間が男性ユーザーの8%を占める(白人の場合)という記述とともに、“Color-vision deficiencies create problems for many people. Don't create software that uses only color coding to convey important information. Color coding should always be redundant to other types of cues, such as text, position, or highlighting.”と書かれている(同書p.25)。「software」を「figure」に置き換えれば、これはそのまま学術図版の作成に通用するアドバイスである。

* 22 雑誌の掲載スペースに余裕がなければ、各抗原と核染色の画像は省略してもよい。

* 23 事実上は単色の明暗であるDABやアルカリホスファターゼ、X-gal染色などではまったく問題はないし、むしろ色盲の人のほうが微妙な明度差に敏感かもしれない。DABとニッケル+DABを用いた茶色と黒の二重抗体染色は、色盲の人が色盲でない人より特に見分けにくいと言うことはない。組織化学染色の中では赤と青の対比を利用したヘマトキシリン・エオシン染色が、エオシンの赤がかぶった部分が鮮やかに浮き上がって見えないため、色盲の人には最も見づらいと言える。しかしそれでもエオシンで染め出された部分の構造は明暗情報としてよくわかるので、細胞の同定などに支障を来すことは少ない。

* 24 この本は同社のコンピューター用のすべてのソフトがユーザーに誤解を生じさせない統一した使い勝手を実現できるようにソフト開発者に示したガイドラインである。しかし見やすい画面表示や人間が陥りやすい錯覚などについても詳しく書かれた同書は、わかりやすい学術図版を作る面でも参考になる面が多い。150ページほどの初版はすでに絶版になっているが、400ページ近い1996年の改訂版がアップル社のホームページから無料で入手できる(<http://devworld.apple.com/techpubs/mac/HIGuidelines/HIGuidelines-2.html>)。PDF版:<http://devworld.apple.com/techpubs/mac/pdf/HIGuidelines.pdf>)。ただし初期の版に比べると色盲の人の比率に関する記述が抜けているなど、若干の後退が見られるようにも感じられる。



図10. 色情報に冗長性を加えていないひどい例

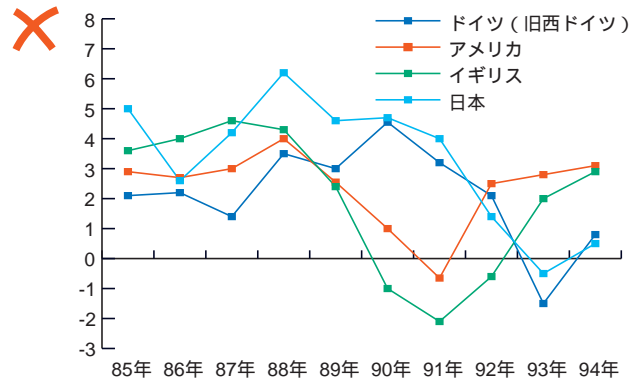
Windows 2000やMacintoshのOS 9では、色に頼らなくても各ボタンが形で識別できる。MacintoshのOS Xは見栄えだけは美しいが、ボタンが同じ形で色だけが違うので、色盲の人には黄色と緑のボタンが区別できない。

学術誌の「投稿の手引き」には、「色を用いる際は装飾目的でなく、必要な場合にのみ使うように」というただし書きを見ることがあるが、色覚バリアフリーの立場から誤解を恐れずに言えば、「色はあくまで美的装飾に限り、色がなくても意味が通じる場合にのみ使う」と考えたほうが正しい。学術誌のただし書きはあくまで安易なカラー利用を戒めるためのものであって、色情報を他と組み合わせて冗長的に使うことの重要性を否定したのではない。

では、色を冗長的に用いるとは、どういう意味であろうか。皮肉なことにアップル社自身の最新のインターフェイスが、とてもわかりやすい反面教師になっている。

WindowsでもMacintoshでも画面に表示されるウィンドウには、ウィンドウを大きくしたり閉じたりするためのボタンが用意されている(図10矢印)。白黒の画面から出発した従来のMacintosh OS 9や、そのデザインを参考に設計されたWindowsでは、ボタンはそれぞれ機能を類推させるような異なる形状にデザインされている。色はあくまで装飾であって、情報伝達の機能は担っていない。したがって各種の色盲でも見やすさに差はなく、バリアフリーが成立している。ところがデザインをゼロから見直した新しいOS Xのウィンドウでは、これらのボタンは形状がまったく同じで色だけが異なる。しかも色の選択が配慮に欠けるため、色盲の人には見分けることができない不便なデザインになってしまっている^{*25}。このように色だけに重要な情報を任せ

A オリジナル



B 線を太く、線種を区別、シンボルを区別

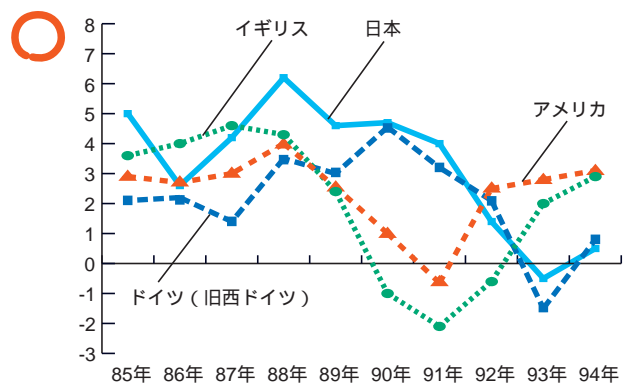
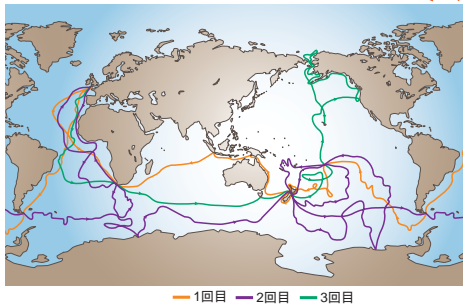


図11. 折れ線グラフの改善例

国内総生産の成長率(93,94年は見込み)。図版作成：橋本知子。

* 25 OS Xではマウスを近づけるとボタンの中に×などのサインが表われるが、重要な情報を隠して一覧できなくするようなデザインは、見栄え優先であり使いやすさの点では褒められない手法である。なおOS Xはウィンドウ以外にも、背景とボタンなど区別すべき要素に明るさや色相の差が極端に小さい色を割り振り、しかもそれらの境界を示す輪郭や仕切り線を極力省くなど、色覚バリアフリーの点では最悪の作りになっている。一方OS 9までのMacintoshは、白黒専用で設計された画面デザインに後から色を付けたという経緯もあって、QuickTime4以降やシャーロックなどここ数年追加された一部分を除いて、ほぼ完璧な色覚バリアフリーを達成している。最初からカラー画面で登場したWindowsは、ウィンドウのデザインは合格だが、他の点では改善すべき点も多い。Isys社のホームページ(<http://www.iarchitect.com/>)は画面デザインの良い例、悪い例を具体的に詳しく説明しており、PowerPointのプレゼンテーションなどを作る際にも非常に参考になる。

A 線の色の違いのみ



B 線種を区別, 矢印を区別, 凡例を直接図中に

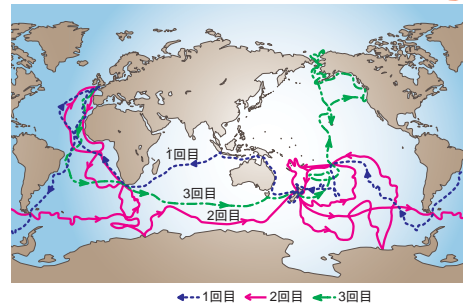


図12. 地図の線の改善例

キャプテンクックの航海. 図版作成: 木村麻樹.

ると, 色覚バリアフリーでなくなってしまうのである.

B: 線種とシンボルによる冗長性

実際の図版で, 色だけで情報を伝えようとするわかりにくい例と, そこに冗長性を加味したわかりやすい例を見てみよう.

図11は折れ線グラフの例である. オリジナルは4つの折れ線を色だけで区別し, その脇に凡例を置いている. 線が非常に細いため, 色の見分けは特に難しい. 色盲の人にはアメリカの赤とイギリスの緑が, 色盲でない人にはドイツの青とイギリスの緑が特に区別しにくい. 両者の違いを言葉で説明しようにも色名以外に差はないため, 指で直接指し示すしか方法はない.

改良版は, まず精度を損なわない範囲で線を可能な限り太くしてある. これによって色の見分けが付きやすくなる. また折れ線には実線と各種の点線を組み合わせ, プロットするシンボルも四角だけでなく丸, 三角などで区別した. これによって色の違いだけでなく, 「三角と丸」や「細かい点線と中くらいの点線」など, アメリカとイギリスの差を様々な方法で言葉で表現できるようになった. また凡例を別に設けるのではなく, 図中に直接線を引いて書き込むことで, どの線が何を意味するのかがわかりやすくなる. 凡例とグラフのようにたとえ数センチや数ミリであっても2つの物体が離れていると, 特に物体の面積が小さい場合には色の照合は難しい. しかし折れ線の一端を直接指し示せば, そこから同じ色を辿っていくのははるかに簡単なのである.

図が込み入っている場合, 図の中に文字を書き込むのは困難な場合もある. そのような場合も凡例を色だけで識別させるのではなく, 略号や数字を各項目に割り振り, それらだけでも図中に直接書き込んだほうがわかりやすい.

図12は同じ原理で, 地図の航路を描いたものである. 線が複雑に入り組んだこの種の図は, 物質の代謝マップや遺伝子の制御カスケードを示す図など, 生物分野でもよく使われる. オリジナルでは, 3回の航海が色の差だけで表わさ

れている. 改良版では実線と点線を組み合わせ, 矢印の形状を変え, 図中に航海の番号を直接書き込んである. これによってたとえ色がまったく識別できなくても, 3本の線を見誤ることはない.

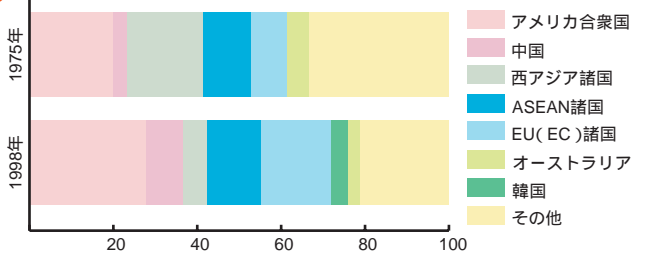
C: ハッチングによる冗長性

図13は棒グラフの例である. オリジナルはきれいな色

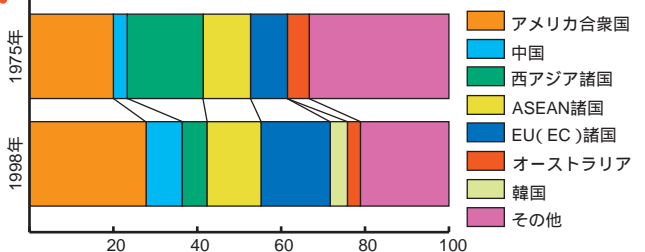
で塗り分けられているが, 例えばアメリカと西アジアや, 中国とEU諸国の色は, 色盲の人にはほとんど区別できない. 色の境界に線がないので, 塗り分けの差にも気が付きにくい. また凡例が横に独立しているので, どの色がどの国を示すのかもわかりにくい. 凡例の順番と棒グラフ内の順番が一致しているので, かるうじて対応が付けられるが, これは



A オリジナル



B 輪郭を追加, 上下の対応の線を追加, 弁別しやすい色に



C ハッチングを追加, 凡例を直接図中に

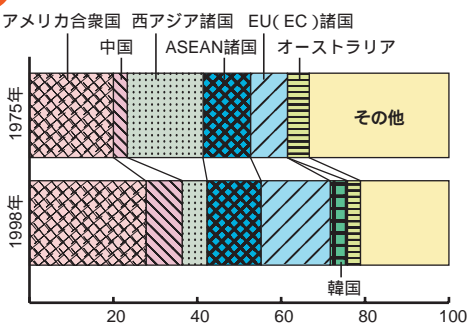


図13. 棒グラフの改善例

日本の貿易相手国の変化. 図版作成: 橋本知子.

情報の冗長性を利用した一例である) ,もし順不同であれば正確な対応付けは不可能だろう .使われている色は色盲でない人にも明確に呼び分けることが難しいような微妙な色あいのため ,どの国が何色かを言葉で説明するのも難しい .

最初の改良版Bは ,輪郭線を追加して色の境界をわかりやすくし ,上下のグラフを対応付ける線を入れた .また塗り分けを ,色盲の人にも弁別しやすく ,色名を間違えにくいはっきりした色の組み合わせに変えた(3.6節M参照) .これである程度わかりやすくはなった反面 ,色が派手でどぎつくなり ,元のグラフの上品さは失われてしまった .

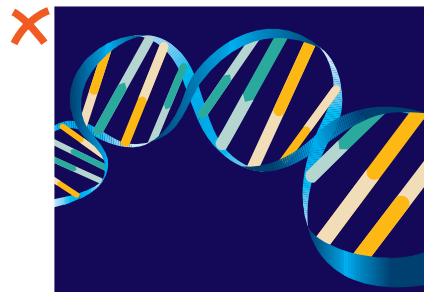
改良版Cは ,色を元に戻し ,代わりにハッチングを加えたものである .また独立した凡例を廃止し ,図中に直接国名を書き込んだ .Bに比べると色自体は弁別しにくくなっているのだが ,ハッチングを加え ,凡例を廃したことによって ,色は情報を正確に伝える役割から開放されたため ,バリアフリー上はまったく問題にはならない .

実際のところ ,誰にでも弁別しやすく ,色名を言いやすい色の組み合わせというのはそう多くない .改良版Bのように色に情報伝達の機能を担わせる限り ,デザインの自由度は小さく ,見栄えの良さとわかりやすさはなかなか両立しない .しかし改良版Cのようにデザインに冗長性を設ければ ,色を見栄えの向上の目的にのみ使うことができる .パステルカラーであろうがアースカラーであろうが ,図版作成者の趣味と創造性にあわせて ,自由に腕を振るうことが可能になる .

図14は二重らせんの概念図である .一般向けの科学雑誌でよく見かけるようなこの手の図版では ,色選びの自由度は比較的高い .しかし例えば4種の塩基GATCのどれとどれが組み合わせるのかを厳密に伝えたい場合 ,塩基を色だけで区別したのでは ,色の組み合わせが特定の2パターンのみに限られていることが必ずしも明確には伝わらない .改良版のように強調したい部分だけ輪郭線を付け ,ハッチングを施すことで ,見る人の視線を誘導し ,色盲の人だけでなく色にさほど注意を払わない人に対しても ,メッセージを伝えることができる .

このようにハッチングは ,冗長性を確保する手段として非常に有効である .コンピューターのグラフィックソフトはカラーの塗り分けに比べるとハッチングの指定が面倒なので ,最近はハッチングを施したグラフを見るのが非常に少なくなった .しかしつい10年ほど前までは ,研究者はロットリングや烏口を握りしめ ,スクリーンを切り貼りして ,実線点線やハッチングを組み合わせで見やすいグラフを描くことに苦心してきた .グラフ等の図版における色覚バリアフリーの問題は ,むしろコンピューターが進歩して誰でも容易にカラーの図が作れるようになったこ

A オリジナル



B 輪郭を付ける ,ハッチングを付ける

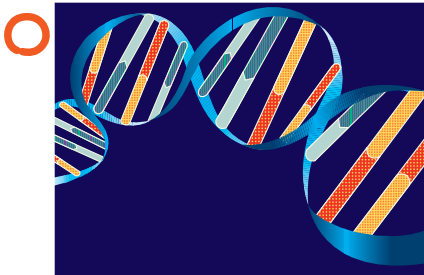


図14. 概念図の改善例

二重らせんと4種類の塩基 .図版作成 : 木村麻樹 .

数年で ,状況が急速に悪化している .私たちが図版で伝えたい情報の量は ,カラーがなかった時代に比べて飛躍的に増えているわけではない .原点に立ち返り ,まず色がなくてもメッセージが伝わるよう白黒でグラフをデザインし ,後から装飾としての彩りを加えることで ,見栄えとわかりやすさを両立させた図版を作成することが望まれる .

D : 明度変化の利用

このようにハッチングは有効な手段ではあるが ,場合によってはハッチングが邪魔になる場合もある .塗り分けの中にさらに情報を書き込む ,地図や生物組織の構造図のような場合である .

図15はその一例で ,地図の等高線のような塗り分けである .オリジナルは明度をほぼ一定に保ち ,色相を等間隔に緑 黄緑 黄色 オレンジと振っていったものである .赤緑色盲では赤と緑 ,黄色と黄緑が非常に弁別しにくいので ,このような図では色の違いを認識することが大変難しく ,高い山と平野部が同じような色に見えてしまう .改良版Bでは境界線を追加して ,塗り分けの違いをわかりやすくしたが ,逆に境界線で仕切られたぶん ,その両側の色の違いがわかりにくくなっている .

このようにハッチングに頼れない場合は ,色盲の人が色相の違いよりも明度の違いに敏感なことを利用することにより ,バリアフリー化を達成できる .改良版Cは ,同一の色相で明るさを暗い緑 緑 明るい緑と変化させた図である .AやBと違い ,このような塗り分けは色盲の人でも容易に見分け

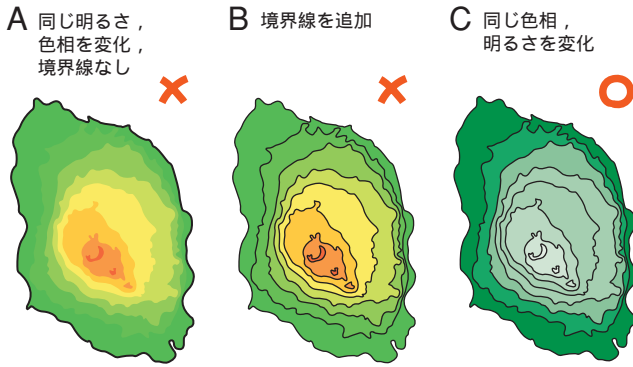


図15. 色相でなく明度の違いの利用

大島の地図. 図版作成: 橋本知子.

られる. 残念ながら地図では長年の色遣いの慣習があり, このような段彩にすぐに変えてゆくことは難しいが*26, そのような慣習に関係ない生物の図などでは, 明度の差を積極的に利用してゆくことが望まれる.

なお人間の眼は明るさを対数的に感じるので, 明度を配分するときは明るさの値が等差数列(例: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70%)でなく, 等比数列(例: 10, 14.1, 20, 28.2, 40, 56.4, 80%)になるようにしたほうが, 変化が等間隔に感じられる.

E: まとめ

以上見てきたような, 色とそれ以外の情報を組み合わせた冗長性のあるデザインの工夫をまとめると, 図22右上のようになる. このように配慮された図は, 色を使って見栄えや見やすさを向上させつつ, 色がなくても十分にメッセージが伝わるようになっている. 本節の図版を白黒コピー機で複写して見ていただきたい. オリジナルの図はコピーでは内容がよくわからなくなってしまうが, 改良版は白黒コピーでも十分に内容が理解できるはずである.

3.6 見分けやすい色の選択

以上のように, 誰にでもわかりやすい図版を作るには色

だけでなく形などでも情報を伝える冗長性を加えることが大切である. しかし色というのは色盲でない人だけでなく色盲の人にとっても, 対象を瞬時のうちに見分けるのに非常に有効なキーである. 色盲の人が見分けにくいのは無数にある色の中の一部だけなのだから, 見分けやすい色を意識して選びさえすれば, 色の持つ特性を利用した効率のよいプレゼンテーションを行える. そこで本節では代表的な色について, 色盲の人がどのような点に困難を感じるかを説明し, それを反映させた, すべての人になるべく見やすい色遣いを提案してみたい.

A: 色の原理の復習

まず, 連載第2回2.6節で説明した色の原理を簡単に復習する(図16). 人間の眼が色として感じられる波長400nm ~ 700nmの単色光に相当する赤から紫までの色と, 赤と紫の混合光であるマゼンタ(赤紫)を円環状に並べると, 人間が知覚可能なすべての色をその内側に表現できる. 色の心理学的な相互関係を考慮して配置した「マンセル表色系」がその代表例だが(連載第2回2.6節D参照), パソコンのグラフィックソフトやDTPの分野では, むしろテレビモニターの3原色である赤, 緑, 青と印刷インクの3原色である黄色, シアン, マゼンタを円状に等間隔に配置した色相表現のほうが一般的に用いられている(図16A: 赤を0度とし, それぞれの3原色が60度ずつに配置される). ししばしば見過ごされているのだが, これらの3原色はテレビや印刷の技術的事情から選ばれた色なので, 人間がそれらの色名からイメージする代表的な色あい(図16Aの円のすぐ内側に白抜き文字で示す)とは微妙にずれていることに注意されたい(連載第2回2.6節E参照).

色をより定量的に表わすために, 光の3原色をどのような割合で重ねるとどのような色になるかを測定して設定されたのが, CIE 1931 xy 色度図である(図16B, 第2回2.6節F, G). これを用いると, 人間の眼が知覚できる色の範囲に比べてテレビモニターで再現できる色の範囲(色域, ギャマット)はかなり狭く, 印刷で再現できる色域はさらに狭い

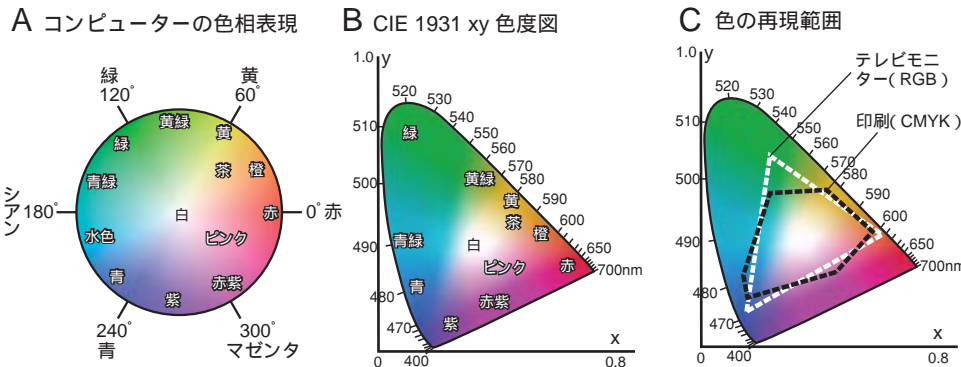


図16. 色の原理の復習

A: コンピューターでは光の3原色を用いて色相を6等分し, 360度の角度で表わす. B: 波長700nmの赤, 435.8nmの青, 546.1nmの緑の光の配合率ですべての色を絶対的な値で表わし, 扱いやすい座標軸に投影したxy色度図. 現在最も一般的で厳密な色表現. C: 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).

* 26 地図でも陸地の段彩は判別が難しいが, 海の水深は青の濃淡で表わすのが慣例になっているので, 非常に判別しやすい.

ことがわかる(図16C). また色盲の人が同じような色だと感じてしまう色あいは xy 色度図の上では一直線に並び、これを混同線と呼ぶ(連載第2回図19, 2.6節I).

B: 赤

スペクトルの端に位置する赤色は、色盲でない人にとっては眼に最も飛び込んでくる鮮やかな色である。しかし長波長の赤(図16Aのコンピューターの色相の0度付近)は、特に第1色盲の人にとっては眼の感度限界を超えた、非常に暗く、見にくい色である(連載第2回2.2節E)。したがって色相の0度、すなわちRGB=(100%, 0%, 0%)のような「純粋な」赤は、黒と間違われるので使わないほうがよい^{*27}。色盲の人にも見やすく、ひと目で「赤」とわかってもらうためには、黄色みの多い朱赤やオレンジに近い赤を選ぶとよい(図17)^{*28}。

C: オレンジ

彩度の高いオレンジは、 xy 色度図の縁の線が右上方向に最も膨らんだ部分に位置している。したがって連載第2回図19の混同線を見ても、赤緑色盲の人にとっては他の色と間違えることがない非常に見やすい色である。しかし彩度の低いオレンジや黄土色は、明るい緑と間違えやすい^{*29}(連載第2回図4参照)。

○ 見分けやすい	✕ 見分けにくい
 朱赤	 濃い赤 (第1色盲にはほとんど黒)
 オレンジ	 紅色 (紫がかったくすんだ赤)
 濃いめの黄色	 淡い黄色(白内障では白と同じ)
 青みの強い緑	 黄緑 (赤緑色盲では黄色と混同)
 水色	 緑 (黄緑同様)
 青	 濃い緑 (赤と混同)
 赤みの強い赤紫	 青緑 (グレーと混同)
 細い線や小さい字の青色	 細い線や小さい字の水色
 細い線や小さい字の朱赤	 細い線や小さい字の黄色

図17. 見分けやすい色と見分けにくい色

わずかに色調がずれるだけで、同じような色でも色盲の人にも見やすいもの(左)と、見分けにくいもの(右)がある。

D: 黄色

「赤緑色盲の人にとって、黄色と黄緑色は同じ色」である。錐体細胞の緑の視物質と赤の視物質は、どちらも黄緑付近に吸収極大波長を持つ。色盲でない人は両者のわずかな反応の差を利用して色を見分けているので、この付近の色の変化には非常に敏感である。一方赤か緑のどちらか一方の視物質しか持たない赤緑色盲の人は、その視物質の吸収極大のなだらかな頂上付近の波長は、ほとんど同じ色に見えてしまうのである(連載第2回図2参照)。他の色の場合は彩度が高ければ見分けが付きやすいことが多いが、黄色と黄緑だけは、どんなに彩度が高くても非常に見分けが付きにくい^{*30}。したがって図版では、黄色と黄緑のどちらか一方だけを使うようにするほうがよい。

ではどちらを使うべきかと言えば、だんぜん黄色である。図16Cでわかるように、画面表示に比べ印刷では再現できる色の範囲が非常に狭い。しかし黄色は、印刷インクの3原色の1つであるため、かなり鮮やかな色も再現できる。これに対し黄緑や緑は、イエローとシアンを混ぜ合わせて表現されるため、彩度の低い色しか再現できない。鮮やかな黄緑は画面ではきれいに表示できても、印刷すると似ても似つかぬ色になってしまう(図18)。このような不都合を避けるため、黄緑はなるべく避けたほうがよいのである。

ただし黄色でも、あまり明るい黄色は避けたほうがよい。白内障の人は水晶体が黄ばんでいるため、白いものも黄ばんで見える^{*31}。このため明るい黄色は、白と区別がつかないためである。

E: 黄緑

上記の理由で、黄緑色は図版に使うのを避けたほうがよい。

F: 緑

緑について注意が必要なのは、絵具のセットに入っている「みどりいろ」に比べ、テレビモニターの緑はかなり黄緑に寄っているという点である。パソコンの色相表示だと緑は120度であるが、絵具やマンセル表色系の緑は130~140度に相当する(図16A)。

パソコンで緑を指定する場合、色相120度のRGB=(0%,

*27 日の丸の赤は、「国旗及び国歌に関する法律」の別記第一の二で「紅色」と定義されているが、「JIS慣用色名」の規格では紅色のマンセル値は「3R4/14」である。3Rという色相は赤(5R)よりも若干紫側に寄った位置に相当する(連載第2回図17A参照)。青に敏感な色盲の人にとってはわずかに紫がかった暗い黒っぽい色に見え、あまり美しい色ではない。

*28 この差は色盲でない人にとっては微妙な差ではあるが、第1色盲の人はこのあたりの色調変化に敏感であり、視認性において大きな差になる。例えば、多くの色盲の人は油性の赤ボールペンの字を黒と区別することは困難だが、赤の色鉛筆は容易に黒と判別ができる。これは、色鉛筆の線が太く色面積が大きいために色の分解能がより高くなることに加え、朱色に近い赤鉛筆の色が、赤ボールペンの暗い赤のインクの色よりも短波長の光成分をより多く含み、視認しやすいからである。

*29 東京育ちの人は「山手線は緑、総武線は黄色」と幼いころから絵本や歌で刷り込まれているため、色盲の人でも色を間違えることは少ない。しかし山手線ほど話題に上がることがない地下鉄銀座線の色は、オレンジでなく緑であると信じている色盲の人が少なくない。

*30 著者は2人とも、この原稿を書くために確認するまでカード式の公衆電話機は黄色だと思っていた。

*31 左右の眼のうち片方だけ白内障が進行したり片眼だけ手術をしたような人では、白内障の眼の視野は非常に黄ばんで見えるが、両目が白内障の場合は色が脳内で補正され、それほど黄ばんで見えないと言う³⁾。しかしこれによって黄色も白に近く補正されてしまうため、やはり黄色は白と区別が付きにくい。

100%,0%)をつい選びがちであるが,この明るい緑には2つの問題がある.1つは,この色は黄緑に近く,色盲の人にとっては黄色と区別がつかない点である.もう1つは,この色は黄緑とともに印刷可能な色域から最も外れた位置にあり,画面と印刷のズレが最も大きい色である点である*32.このように色相120度付近の緑は,画面では黄色と区別がつかず,印刷すると赤と区別がつかないので,絶対に避けたほうがよい.一方同じ緑でも,色相で150~160度あたりの青みの強い緑は,色盲の人にも赤や黄色と混同することなくひと目で「緑」とわかる.ぜひこのような色を使うとよい(図17)*33.

G: 青緑

赤緑色盲の人は緑から青の色の差には敏感である.しかしこのあたりの色は,逆に色盲でない人には差を感じにくい.また赤緑色盲の人も,青緑の色あいによっては灰色と区別がつかない色がある(連載第2回図4参照).第3色盲や白内障の人には,緑から青の範囲の色は混同線の上に乗ってしまい,明度の差以外は区別がつきにくい(連載第2回図19C).したがってこのあたりの色は,なるべく使わないほうがよい.

H: 水色(シアン)

水色は色盲の人にもひと目で見やすく,わかりやすい色であり,塗り分けに用いるには優れている.また印刷でも鮮やかな色が再現しやすい.しかし色盲でない人にとって,水色で書かれた小さい字や細い線は非常に見にくいとされている.文字や細い線には,水色は避けたほうがよい(図17).

I: 青

青は赤緑色盲の人には明るく見え,色盲でない人には暗く見える色である(連載第2回2.2節H).またパソコンで指定するRGB=(0%,0%,100%)の明るい青は,緑ほどではないがやはり印刷では再現できない(図18).少しシアンに寄った色のほうが,正確な再現が期待できる.

J: 紫

紫には,可視光の端に位置する青紫(violet)と,赤と青の光を混ぜた赤紫(purple, magenta)がある.この付近の色は赤緑色盲の人には区別が難しい.赤紫は,青に赤が加わっていることがわからず,青と同じ色に見える*34.色盲の人にもひとめで「紫」とわかってもらうためには,マゼンタ(色相300度)よりもさらに赤に寄った,赤みの非常に強い紫を選ぶとよい.

K: ピンク

赤緑色盲の人にとって,ピンクは水色と混同しやすい.ど

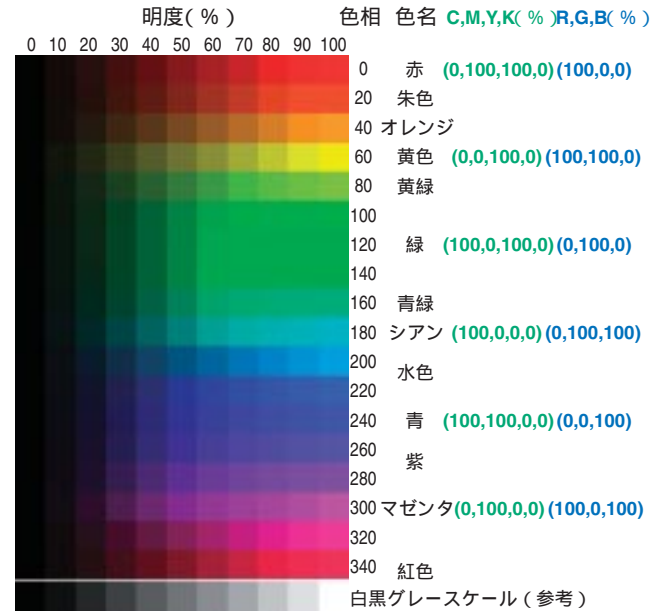


図18. 印刷しにくい色

黄色,シアン,マゼンタ,黒の4色のインクを使う印刷では,これらに近い色相はきれいに階調を表現できるが,テレビモニターの3原色は複数のインクの重ね合わせになってしまい,暗い彩度の低い色しか表現できない.これらの色もきれいに印刷するため,美術書などでは緑とオレンジのインクを加えた6色印刷(パントン・ヘキサクローム印刷)が使われ始めているが,一般誌や学術雑誌では普及していない.

うしても必要な場合は,なるべく赤紫に寄ったピンクを使うとよい.

L: 茶色

連載第2回の図4でシミュレーションしたように,赤から緑のほとんどの色が,色盲の人にとっては茶色の一種のような色に見える.このため茶色は,明るさや鮮やかさによって赤,黄色,黄緑色,緑色など様々な色と非常に混同しやすい.明解な弁別が重視される図版には,なるべく使わないほうがよい.

M: 見分けやすい色のセットの例

見やすい図版を作るために便利な色遣いを具体的に示して欲しいという要望が強いので,以上の議論を踏まえて色盲の人にも色盲でない人にも見分けやすく,色名が同定しやすい,はっきりした色で,画面でも印刷でも同じように表示できるというような色のセットを作成してみた(図19A).連載第2回に説明したとおり赤緑色盲と第3色盲や白内障では見にくい色の組み合わせが大きく異なるので,すべてを満足

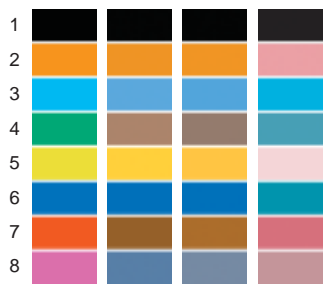
*32 図6や図18に示したとおり,緑はRGB表示でG=60%より上は,印刷では再現できない.言い換えれば,RGB=(0%,100%,0%)の明るい緑は,印刷するとRGB=(0%,60%,0%)のような暗い緑になったり,プリンターによっては色相のずれた色に変えられたりしてしまう.このような緑は,赤緑色盲の人にとっては赤と区別がつきにくい(連載第2回図4参照).なお緑は赤より比視感度が高いため,画面上ではRGB=(0%,100%,0%)の緑はRGB=(100%,0%,0%)の赤よりずっと明るい.半分の明るさのRGB=(0%,50%,0%)の緑とRGB=(100%,0%,0%)の赤が,非常に見分けにくくなる.

*33 色盲でない人は青みの強い緑とそうでない緑をあまり区別しないことが多いが,色盲の人にはこれらは黄色と黄緑よりよほど違った色に見える.

*34 2チャンネルの蛍光写真の項(3.4節B)で推奨したマゼンタと緑の画像は,実は赤緑色盲の人には青と緑の画像とほとんど同じに見える.

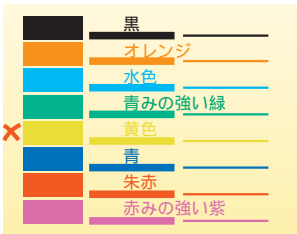
A 見え方のシミュレーション

オリジナル 第1色盲 第2色盲 第3色盲

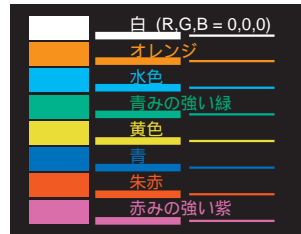


色相	C,M,Y,K (%)	R,G,B (0-255)	R,G,B (%)	
黒	--度	(0,0,0,100)	(0,0,0)	(0,0,0)
オレンジ	41度	(0,50,100,0)	(230,159,0)	(90,60,0)
水色	202度	(80,0,0,0)	(86,180,233)	(35,70,90)
青みの強い緑	164度	(97,0,75,0)	(0,158,115)	(0,60,50)
黄色	56度	(10,5,90,0)	(240,228,66)	(95,90,25)
青	202度	(100,50,0,0)	(0,114,178)	(0,45,70)
朱赤	27度	(0,80,100,0)	(213,94,0)	(80,40,0)
赤みの強い紫	326度	(10,70,0,0)	(204,121,167)	(80,60,70)

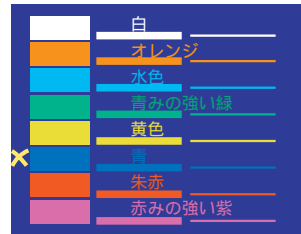
B クリーム色の背景



C 黒の背景



D 青の背景



くなく、なるべく3つか4つ程度の色に絞ったほうがよい。この場合は、赤～緑の範囲だけから色を選ばず、かならず赤～緑(暖色系)と緑～青(寒色系)のそれぞれの側から交互に選ぶようにする(図20A, B)。

また、たとえ暖色と寒色であっても、同じような明るさの色が並ぶと見づらくなる。2色ならば明るい色と暗い色、3色ならば明るい色、暗い色、中間の色を組み合わせ、4色以上ならば明るい色と暗い色を交互に並べると、見分けが付きやすい(図20C)。ただし前述のとおり彩度の高い緑や黄緑は、画面では明るく表示されても印刷すると暗くなってしまうので、注意が必要である。

図19のセットでは暖色と寒色、明るい暗いの対比が交互になるように配列したので、棒グラフなど広い面積の塗り分けではこの順に色を使ってもらえば見やすいはずである。3色だけ必要な場合には最初の3つを、5色なら上から5つを、というように選ぶとよい。ただし水色と黄色は、細い

図19. 色盲の人にも色盲でない人にも見やすい色のセットの提案

A: 左からオリジナルの8色と、各種色盲でのシミュレーション。色あいは変化するが、それでも弁別は可能である。また色の名前も、比較的間違えにくい。赤は、第1色盲の人に見やすいように朱赤にする。黄色と緑の間の黄緑系統の色は、赤緑色盲の人には黄色やオレンジと見分けがつかないのでせんぶ避ける。緑は赤や茶色と間違えないよう、青みの強いものを選ぶ。紫は、青に近いと区別ができないので、なるべく赤に寄ったものを選ぶ。朱赤から黄色の間では、見た目の明るさが違う3色(赤、オレンジ、黄色)を配分する。青系では、見た目の明るさが違う水色と青を配分する。という基準で選んである。右: 各色の色相の角度表示と、商業印刷を重視した画像ソフトでのCMYKやRGBによる色指定の例。CMYKがキリのいい数字になるよう調整してある。一番右は画面表示やプリンターでの印刷を重視した画像ソフトでのRGBによる色指定。キリのいい数字になるよう調整してある。連載第2回2.6節A, Bに説明したように、RGBとCMYKの値の関係はパソコンの機種やOS, 用いるソフト, 画像の色管理情報(プロファイル)の種類などによってかなり変化するので、この図の値はあくまで参考である。B~D: 色つきの背景にした場合。同系の色の文字は使わないほうがよい。

する組み合わせは難しい*³⁵。ここに示した色のセットでは、第1色盲と第2色盲それぞれ数人に試してもらった結果、色の弁別や色名の同定が容易であるという評価が得られた。しかし第3色盲では、青と緑は判読が難しいと予想される。また白内障の人には、黄色は白と見分けにくいと思われる。

この色のセットは、白バックだけでなくクリーム色などの背景でもほぼ問題なく使えるが、この場合同系色の黄色は抜いたほうがよい(図19B)。また黒バックでは、黒のかわりに白を用いればよい(図19C)。青バックの場合は、同系色になる青は抜いたほうがよい(図19D)。

N: 見分けやすい色の組み合わせ方

実際の図版ではあまり多くの色を同時に使うのは好まし

線や小さな文字では見分けにくい(図17)。折れ線グラフなど小面積の塗り分けでは、水色の代わりに青色を優先して用い、黄色もなるべく避けたほうがよいだろう。

また、このセットでは色名が同定しやすいようにはっきりした色ばかりを並べたが、グラフなどでこれらの色を多数同時に使うと、図13Bのようにどぎづくなりすぎる可能性もある。しかしパステル調の色どうしを並べると、見た目にはきれいな反面、色の弁別や同定が難しくなるので(図20C右下)、図13Cのようにハッチングなどの冗長性を加えるのでなければ避けたほうがよい。このような場合は、彩度の高い色の中に、パステル調の色を少数組み合わせる方法もある(図20D下)。

*³⁵ 市原は、石原表を解析してすべての色覚のタイプの人が一様に見やすいようにxy色度図上の位置や明るさを分散させた4色を、ホームページなどで利用者が間違えにくいweb accessibility pallet(WAP)として提案している⁴⁾。本稿図19で紹介した色よりも、どの色覚タイプの人でも間違えにくいというメリットがあるが、全4色と少ないのが残念である。

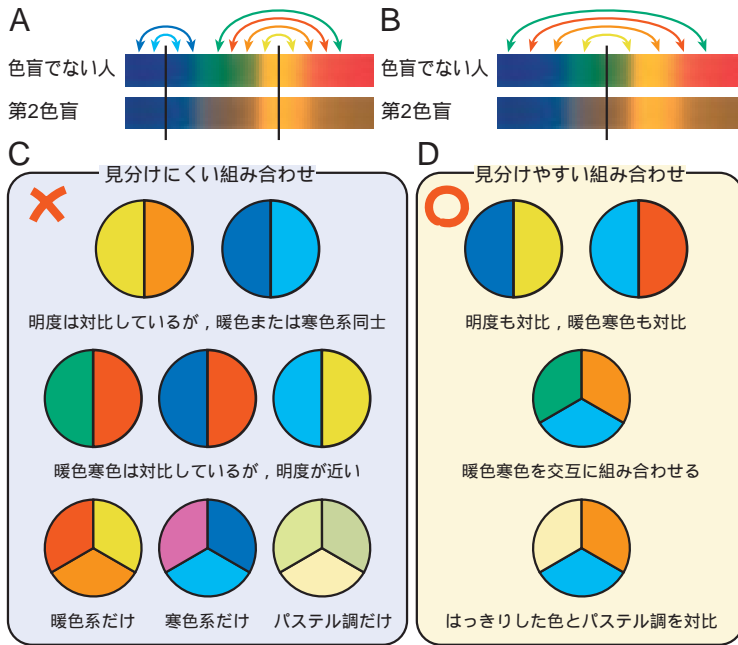


図 20. 色の選び方

A: 赤と緑の間や、青と紫の間で色を選ぶと、色盲の人には違いがわかりにくい。B: 緑を境に赤側(暖色系)と青側(寒色系)の色を交互に組み合わせると、見分けやすい。C, D: 図19の色から、見分けにくい組み合わせ(C)と見分けやすい組み合わせ(D)を示す。

3.7 学会でのスライドやPowerPoint, ポスター, さらにホームページのデザイン

A: 文字色と背景色の選定

学会のスライドやポスター, また研究室のホームページなどの作成においても, 注意すべき点は論文の図版と基本的には同じである。1つだけ大きく違うのは, 論文の図版が基本的には必ず白バックなのに対し, 学会発表やホームページでは黒バックや青バックなど, 背景色のうえに文字や図形を載せることが多い点である。このような場合, 文字や図形の色が背景色と区別しにくい組み合わせになっていると, 書いてあるもの自体が容易に視認できなくなる。

図形や文字の色と背景色を選ぶ際には, 色相だけを変えるのではなく, 明度を大きく違えるとよい。明るいバックに暗い文字か, 暗いバックに明るい文字にする。明度の似通った赤と緑などを同時に使用すると区別がつかない。長波長の光を認識できない第1色盲の人は, 暗い背景色における「濃い赤」の文字がまったく読めないことがあるので, 暗い背景に赤い文字は避ける(連載第2回図6)。また情報載っている面積が小さいと, 背景色との違いを区別しにくくなり, 図形そのものが視認できなくなることがある。

いろいろな背景色と文字色の組み合わせと視認性に関しては, たなか氏の「カラーバリエーション案内」のホームペー

ジ(http://sun.endless.ne.jp/users/tanafic/colorfiction/ank/ank_fr.htm)や, マイクロソフト社の「色覚に障害を持っていたとしたら, あなたのサイトは見えるでしょうか?」のページ(<http://www.microsoft.com/japan/msdn/columns/hess/hess10092000.asp>)が参考になる。

B: 字の強調色の問題

明るいバックに黒の文字列の中で強調したい部分を「赤」文字で示すことは日常的に行われているが, 3.6節Bで説明したように「濃い赤」(長波長の赤)を使用すると, 第1色盲の人にとっては黒い字と区別できないことがある。この結果赤字は黒と認識され, 強調されては見えない(連載第2回図6)。このような場合も, より短波長側の橙や朱色を用いると黒と識別しやすくなる。

また, 冗長性を確保するため, 強調したい文字は単に色を変更するだけではなく, 字の大きさや書体(フォント)を変えたり, 文字をイタリックやボールドにしたり, 下線や傍点, 囲み枠を併用するとさらに目立つようになる。

C: 書体(フォント)の選定

線が細い明朝体やTimesでは色面積が小さいため, 文字色を見分けるのが困難である。色分けをしたい文章では, 線が太いゴシック体やArial, Helveticaのボールド書体を使うとよい。

D: 色を区別できなくても支障がない場面では, 自由にカラフルな色を選んでよい

色盲の人に配慮するあまり, 色数の限られた味気ないスライドやポスター, ホームページになってしまったのでは, せっかくカラーが使える機材を用いる意義が薄くなってしまふ。例えばスライドの見出しと本文は, 違う色であることが観客に認識できても認識できなくてもプレゼンテーションの効果に差はない。このように装飾効果だけが目的の場合には, むしろ自由に色を選んでよい。

またPowerPointなどの発表では, 単調な白や青の背景に文字や図形だけカラフルな色を使った発表を見かけるが, むしろ淡いパステルカラーの背景に地味な色合いの文字や図形を組み合わせたほうが, 視認性に影響することなく, カラフルな印象を与えることができる。

3.8 学会などで発表する際の留意点

A: 色名のみによる指示を避ける

3.4節Fの図版説明と同様に学会での発表の際も「緑色を示しています」のように色名だけで指示せず, ポインター等で対象を指し示しながら「この緑色の は を

示します」と表現すれば、理解されやすくなる。

B: 図の凡例などに、色だけでなくその色名も記入する

色盲の人は色盲でない人の知覚カテゴリーにあわせて決められた色名にうまく対応できないので、ポスターやスライドの図に塗り分けがあることは理解できても、それが何色と呼ばれる色で塗り分けられているかには自信が持てないことが多い。色盲の人の多くは茶色の傘を緑と間違えたり、ピンクのブラウスを水色と間違えたりして、周囲の人に変な顔をされた経験を持っているため、他人の前で色の名前を口に出すことに慎重になっている。

学会場で大学院生のポスターを前に「このグラフの黄色い線は何を示すのかね?」と質問して、「は? この黄緑の線ですか?」と聞き返されるのは、立場上間違いが許されない偉い教授にとってはなるべく避けたい事態である(残念ながら男性優位が続いている学問の世界では、事実上大学教授の20人に1人は色盲である)。塗り分けの内容を示す凡例に色名を併記しておく、教授は色名を口に出す前に凡例をチラッと見て確認することができ、スムーズに議論を進めることができる。

C: 赤のレーザーポインターは第1色盲の人に見えないことがある

赤いレーザーポインターは長波長の光を使用しているために、第1色盲の人には見えないことがある。635nm, 650nm, 670nmなどの波長が使われているが、図21で示すようにヒトの網膜の比視感度はこの波長領域で急激に低下しているため、長波長のレーザーほど暗く感じる^{*36}。一方可視光領域が長波長側から狭まっている第1色盲の人の比視感度曲線を見ると、635nmのレーザー光は第1色盲の人にも辛うじて光として感じられるものの、650nmや670nmのレーザー光は見えないことがわかる。これでは演者がどこを指し示して説明をしているのか、まったくわからない。一方最近急速に普及してきた緑色のレーザーポインターはすべての人の比視感度曲線のピークに近い532nmという波長を持ち、誰にでも明るく見やすい(図21)^{*37}。学会の運営関係者や大学・研究所のセミナー室担当の方は、ぜひ緑色のレーザーポインターを用意していただくと素

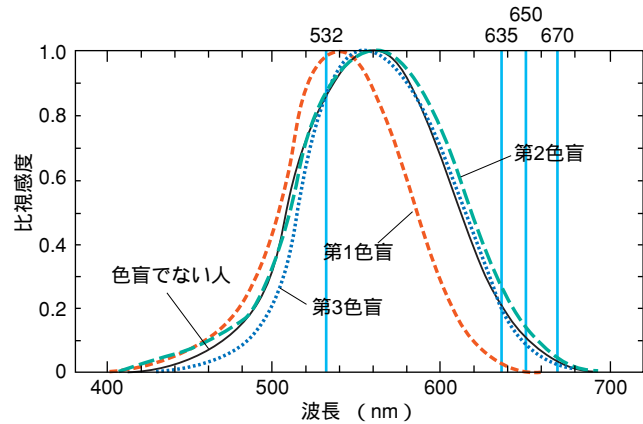


図21. レーザーポインターの波長

赤いレーザーポインターの色は、種類によっては第1色盲の比視感度の限界を超えており、ほとんど知覚できない。緑のレーザーの波長は比視感度のピークに位置し、誰にでも明るく見やすい。

晴らしい^{*38}。

なおレーザーポインターを使わないでも、PowerPointでマウスポインターを用いたり、オーバーヘッドプロジェクター(OHP)ならOHPシート上でペンなどを用いて図を指し示すことにより、わかりやすく説明することができる。狭い会場では指示棒も便利である。これは一見旧式に見えるが、視認性という点では実はきわめて有効で、バリアフリー性も非常に高い。

D: 学会参加者への周知

学会における発表の色覚バリアフリー化は、決して高度で複雑なノウハウの塊ではなく、簡単なアドバイスで実現できるものばかりである。アメリカ視覚眼科学会(Association for Research in Vision and Ophthalmology; ARVO)ではJ. NeitzとM. Neitzの尽力で、過去数年来参加者に対して事前配布される演題募集要項に色覚バリアフリーな発表法に関するアドバイスが掲載され^{*39}、当日も毎年ポスター会場で、バリアフリーの解説が掲示されてきた。(内容は<http://www.mcw.edu/cellbio/colorvision/>で「excuse me.」の項を参照)。北米神経科学会(Society for Neuroscience)でも「Avoid using red and green next to

*36 635nm, 650nm, 670nmのレーザー光は、同じ1mWの出力なら目視時の明るさの比率はだいたい6:3:1になる。平成13年1月から消費生活用製品安全法の規制対象にレーザーポインターが追加され、JISC6802「レーザー製品の安全基準」に従い、レーザーの出力はまばたきなどの嫌悪反応によって安全に使用できる程度に抑えなければならないことが定められた。そのため通常レーザーの出力は1mW以下である。

*37 赤緑色盲の人はこの波長のレーザー光を黄色と区別することはできないが、ポインターとしての目的にはそれで問題ない。

*38 国内では2社が製造販売していたが、これまでの製品が出力3~5mWであったため消費生活用製品安全法の規制対象になった。現在各社が低出力モデルへの転換を換行っており、この秋より販売を再開する予定である。DeHarpporte Trading Companyからは出力1mW以下のモデル(GLV1)が販売されており、このモデルは比較的広い会場でも十分に明るく使いやすい。出力5mWのモデルも販売されているが、小さな会場では眩しすぎるの指摘もある。(有)ブロードバンド(<http://www.bblaser.com/>), (株)高知豊中技研(<http://www1.odn.ne.jp/kg/page/pointer.html>), DeHarpporte Trading Company(<http://store.yahoo.com/deharpport/greenlaspoint.html>)。DeHarpporte Trading Companyの商品は(株)エル・エム・エス(担当:藤田守孝 TEL:03-5842-4161)が輸入代行している。

*39 今年だけはなぜか手違いで、学会のホームページ(<http://www.arvo.org>)に掲載されていない。

each other since many are red/green color blind.」と、簡単ではあるがアドバイスされている(本年度年会のプログラム <http://apu.sfn.org/images/AM2002/prelimprog.pdf> の p.72)。このようなアドバイスの掲載は非常に有効なので、視覚に関連する分野だけでなくすべての分野の学会の運営関係者の皆様に、演題募集要項に同様のコメントを掲載するようお願いできれば、非常に嬉しいところである。

3.9 講義や授業に際して注意すべき点

読者の中には、将来大学や小中高校で講義や授業をする人が少なくないと思われるので、さらにいくつか注意点を挙げておく。

A: クラスには必ず色盲の児童・生徒・学生がいる

先天赤緑色盲は、男性20人につき1人は必ず存在する。男女半々の40人学級ならば、各クラスに1人は色盲の児童・生徒がいるという勘定になる。大学になれば講義に出席する学生数はさらに多い。したがって本来は、すべてのクラスで、色盲の人にもわかる色覚バリアフリーな授業をすることが必要なのであるが、これがこれまですべての教師に徹底されてきたとは、残念ながら言いにくい。

従来は学校健診において、一斉に色覚検査が行われてきた。教師はどの児童・生徒が色盲であるかを検査によって把握することで、そのような生徒がいるクラスでは色覚バリアフリーを心がけるという建前になっていた^{*40}。だが実際は、検査によって色盲と判定された生徒に一方的に対応を強いることになりがちで、色覚検査が授業の色覚バリアフリー化でなく、進路の制限など差別助長の一端となってきた面がある。そのため、学校での色覚検査^{*41}は平成15年度から全廃されることになり、現在の小学校3年生より若い子ども達は、一斉検査を受けないことになる。

当然のことながら、色覚検査がなくなっても色盲の人が居なくなるわけではない。検査の廃止により、教師はどの児童・生徒が色盲であるかを把握することができないので、クラスに必ず色盲の生徒がいることを前提として色覚バリアフリーな授業を行う責務が生じてきた。色覚の一斉検査の廃止は、3.3節でも議論したように色盲は本人の側が独力で対処すべき問題ではなく、社会の側がそれに対応しなければならぬことを意味している。

B: 黒板の板書に関して

黒板の板書では、白チョークでは問題にならないが、明度の低いカラーチョークでは、黒や緑の黒板の色とチョークの色の色相の差をあまり感じられない色盲の人にとっては、見やすさが大きく悪化する。したがってカラーチョークを使う際は、明度の低い赤、青、緑はなるべく避け、明度の高い黄色のチョークを優先して使うのが望ましい。

特に赤チョークで板書された文字は、赤緑色盲の人にはほとんど視認できないことがある。最近ではこの対策として、朱色のチョークが「色覚異常対応カラーチョーク」として販売されるようになった(天神チョーク <http://www.tenjin-chalk.co.jp/eye.htm>)。これにより赤チョークの視認性は以前よりも向上した。しかしそれでも緑の黒板や古い色褪せた黒板などでは、朱色であっても他の色よりはるかに見づらい。「対応」という言葉を過信することがないようにしたい^{*42}。

スライドやパソコン画像で使える赤や青や黄色に比べ、チョークの色はどうしても彩度が低い。どのような色を使っても、教室の照明の条件や生徒の色盲のタイプによっては、カラーチョーク間の区別が困難な場合がある。色を変えるだけでなく必ず下線や囲み線を併用して板書する必要がある。

以上から、板書に際しては次のような点に留意するとよい。主に白や黄色のチョークを用いる。

強調のために赤チョークを使用することを避ける。やむを得ず赤チョークを使用する場合は、朱色を使い、別の色で下線や囲みを付ける。

文字、図、絵等はできるかぎり大きくはっきりと書く。

図を描いて色分けをする場合には、文字や記号を併記する。また色の境界線は白チョークを用いて区別をはっきり描く。

カラーチョークを使用する場合、色名をはっきり告げるようにする。

C: ホワイトボードの板書に関して

ホワイトボードはどの色のマーカーでも文字が視認できるという点で、黒板より優れている。学校での板書器具は黒板でなければならないという規定はなく、すでにパソコン演習用の教室では埃がでないようにとホワイトボードが用いられている。通常の教室で黒板を使用しているのは長年の慣習に過ぎない。スライドやOHP、液晶プロジェクター

*40 平成元年に文部省が全国の小中高等学校に配付した「色覚問題に関する指導の手引き」は、カラー写真入りの30ページの冊子で、指導の基本、学生指導のあり方、生徒指導のあり方、進路指導のあり方などがわかりやすく解説されている。しかしこの冊子は学校教頭と養護教諭にしか配付されず、日常生徒と接する機会の最も多い一線の先生方の目に止まることはほとんどなかった。この冊子の内容は、http://www.nig.ac.jp/labs/DevGen/monbushou_tebiki_1.htmlに掲載してある。

*41 学校保健法施行規則にしたがって、平成6年度までは小学校1年生と4年生、中学校1年生、高等学校1年生のときに色覚検査が行われていたが、平成7年度からは小学校4年生時の1度だけに減らされ、現在に至っている。

*42 青のチョークも色盲がどうかにかかわらず、明度が低いため視認しにくい。連載第2回2.2節Hで述べたように、赤緑色盲の人よりもむしろ色盲でない人のほうが、青のチョークを暗く見づらく感じている可能性もある。

を併用するうえでは、スクリーンとしても使用可能なホワイトボードのほうが使いやすいとも言える。新規に教室を設置する際は、なるべく黒板を廃し、ホワイトボードを用いることが望ましい。

色盲の人にとって、ホワイトボードの色マーカーは色チョークより視認しやすいとはいえず、黒、緑、赤マーカーで書かれた文字の間では色の区別が困難であることが多い。黒と対比するには青を優先して使うとともに、黒板の場合と同様、色分けの部分は下線や囲みなどで区別できるようにし、色名を告げるといった配慮が重要である。

D：色の名前に関する重要な注意点

色盲の人の多くは、色を言い間違えて周囲に当惑された経験を持つ。これが私的な会話ならまだよいが、授業中に先生に指名されて色名を答えさせられ、それが間違いだと直された場合、生徒の心に与える傷は大きい。このようなことがいじめのきっかけになることも少なくない。どの生徒に対しても、特に大勢の前では、色名を尋ねることは絶対避けるべきである。

また、生徒に作業を指示する場合、「色のボールを取って」のように色だけで対象物を指定すると、色盲の生徒は間違える可能性が高い。実験や演習など他の生徒の前で何かをさせる場合などは特に、「右から3番目の色のボールを取って」のように、場所や形も指定するよう心がけたい。

ワークシートなどで色を指示どおりに塗らせるような課題を出した場合、生徒が塗る色を間違える可能性も大きい。どんな色でも、塗り分けがされていれば可とすべきである。

おわりに

本連載は3回にわたって、色覚のメカニズム、先天色盲と後天色盲の原因、色覚のタイプによる色の見え方の違い、色の定量的表現、色盲の治療や矯正などについて解説した。最後に多様な色覚に対応したバリアフリープレゼンテーション法を紹介し、図22に重要なポイントをまとめた。

多くの人は普段意識していないが、色に情報を載せて他人とコミュニケーションするには、誰が見てもその色が同じように見えることが前提になっている。しかし色覚特性が大きく異なる色盲の人がこれだけ高い頻度で存在し、色盲でない人にも色覚には大きな個人差が存在するうえ、加齢に伴って色覚はさらに変化する。多数派の色覚に対応してカテゴリー化された「色名」は、色覚のタイプが異なる人には色との対応が難しい。このように色は文字や記号のように絶対的な指標としては、コミュニケーションに使うことはできない。

とはいえ生物の長い進化の過程で培われてきた色による情報の読み取りは、情報を瞬時に把握するためには非常に

便利なキーである。たいていの色を見分けている色盲の人にとっても、これは同じであることに注意したい。色覚バリアフリーにするということは、色を使わず白黒にするということでは決してない。多様な色覚に対応した、上手な色の使い方をすることである。

今回紹介した色盲の人にも見分けやすい「バリアフリーカラーパレット」(図19)を活用し、さらに色だけに頼らず、色以外の方法(文字や記号、形状の違いなど)を必ず併用して冗長的に情報を発信することで、色を用いたコミュニケーションのデメリットを避け、メリットだけを活かせるようになる。ぜひご協力をお願いしたい。

学校の健康診断で色覚検査が廃止され、遺伝に関する授業も減ってしまうことで、色覚に多様性があることを人々が知るチャンスは今よりも少なくなるかもしれない。だがむしろ、色覚に多様性があることは、血液にいろいろな型があるのと同じような当然の常識として、多くの人に認識されるべきである。A型糖鎖抗原やB型糖鎖抗原への凝集能力を欠いたO型の血液型の人や、他より人数が少ないAB型の人は、「血液異常」であるわけではない。同様に多様な色覚も、人数の大小で「正常」と「異常」に区別されるものではなく、単なる遺伝的多型(ポリモルフィズム)であるという認識が大切である。

20世紀における色盲の歴史は、21世紀のゲノム時代における科学者の責務に対し、大きな教訓を与えてくれる。色盲の人は他の人と色の見え方が異なるという知識はダルトンの時代からあったが、実際にどの人が色盲であるかを判別するのは難しかった。したがって色盲の人でも努力したり色のセンスが優れていれば色を扱う職業にも自由に就くことができ、色盲でない人でも色に関する注意深さやセンスが劣っていれば、そのような職業には就けなかった。実力による勝負が成立していたわけである。

しかし状況は石原表の出現で一変する。簡単な検査で正確に色覚を判定できるようになると、進路指導、入試、就職などで、安易に色盲の人を排除する風潮がすぐに出てきた。その職業の適性に他の様々な、より重要な要素が多数あるにもかかわらず、簡単かつ確実に検査できる色盲についてだけ、「万が一もしかしたら、そのような状況では色盲の人は対応できないかもしれない」というような非常に稀な状況に対する科学的検証を欠いた憶測で、一律な排除を合理化してきた例が非常に多い。

このように

簡単確実な検査法が確立する

「万が一」を考えて安易に過剰な排除体制を取る

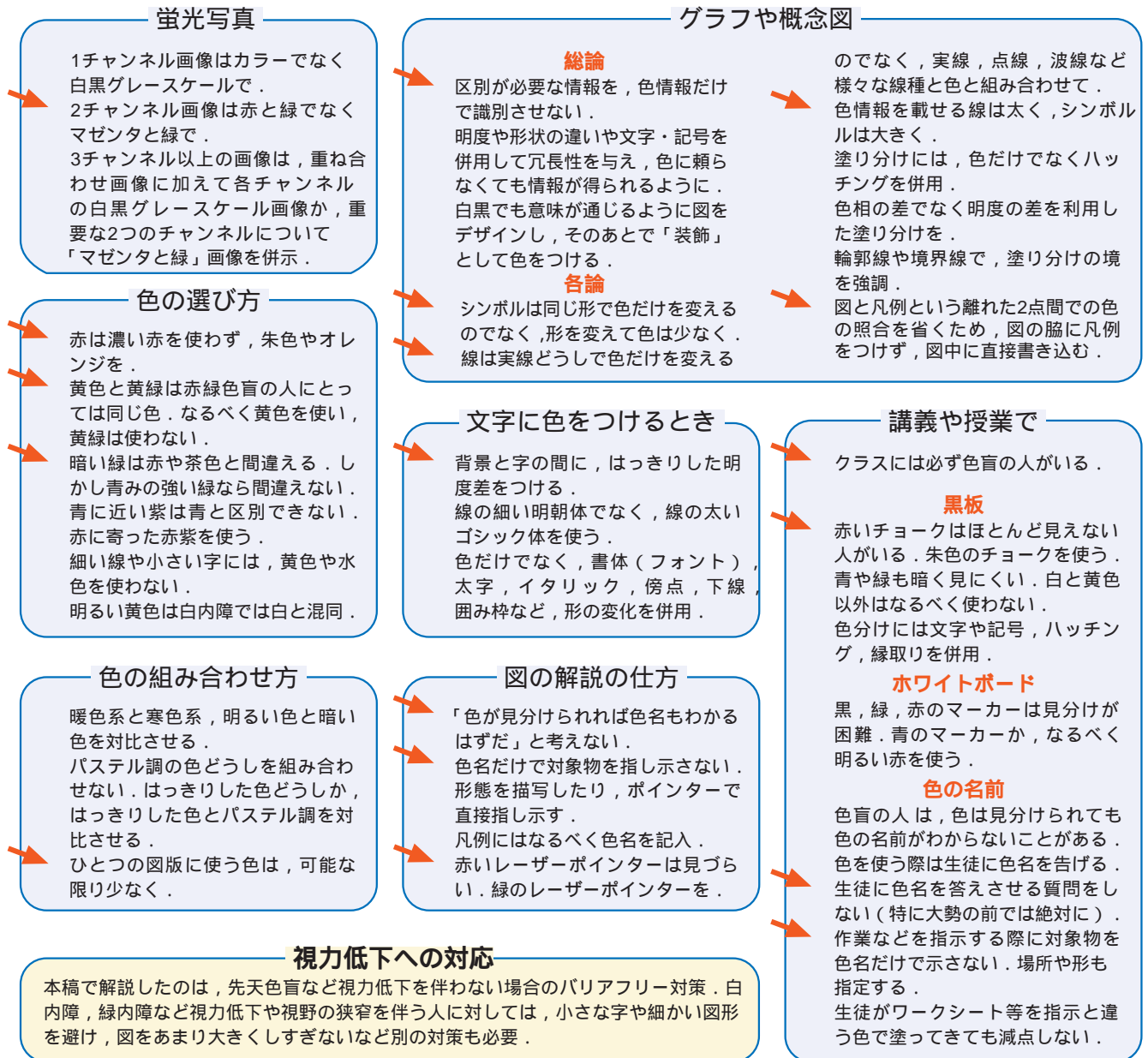


図22. 色覚バリアフリーのまとめ

赤い矢印は、特に重要で、ぜひ参考にさせていただきたいポイント。

という図式は、残念ながら今も多く繰り返されている。遺伝病の保因者であるかどうかを診断できるようになったとたん、その人たちが保険に入れなくなる例などは、現代の日本でも現実に起きている。

人間は元来非常に多様であり、その多様性を認めて誰もが同じように幸福に暮らせる手段を提供することが科学の責務である。しかし科学の進歩によって従来見つけることができなかつた多様性を見つけれられるようになると、その一部を「正常」、残りを「異常」と判定して後者に不利益を与えるという差別構造に、現代科学は知らず知らずのうち

に加担してきてしまっている。色盲においては、我々科学者(特に医学関係者)が親切なヒントのつもりで何気なく口に、解説記事等を書いてきた、「こういうものが見分けられない可能性がある」という推測が、すべて一般の人には「権威ある専門家の確定的な助言」として受け取られ、過剰排除の科学的根拠として利用されてきたという構図がある。しかし科学者には、自分たちの発言が社会に対してそれだけの権威と効果を持ち、結果として差別を惹き起こしたという当事者意識が非常に薄い。一部の献身的な例外を除いては医師の視野は症状の改善や進路指導など患者個人のレベ

ルに限られがちであり, 社会に対するきちんとした啓蒙活動をして過剰排除や差別の構造にメスを入れることが, 自分たちにしかできない使命であるという認識が十分ではない。

我々科学者の日々の努力によって, 人間の様々な特性を左右する遺伝子を簡単確実に検査できる時代が迫っている。生活にさしたる支障のない色盲などのレベルではなく, 寿命の長短, 癌などの病気の発症しやすさ, 精神疾患のかかりやすさなど, これまで意識されていなかった無数の「遺伝子異常」「突然変異」が, 遺伝子検査で検出可能になることが予想される。だが人間は, 「何かネタさえあれば, ことあるごとに正常と異常に分けて一方を差別したがる」という哀しい生物でもある。色盲ですらこれだけの差別につながったのだから, 今後続々と登場するであろう遺伝子検査によって「早死にしやすいかもしれない」とか「精神病になりやすいかもしれない」と「科学的に」判定された人がどのような差別を受け, 不利益を被るかは, 想像に難くない。科学者が自己の言動が社会に与える効果を真剣に見直し, たとえ善意の助言のつもりであっても差別形成に加担しかねない危険を認識し, 結果として生じうる差別構造に対する当事者意識と責任感を持たない限り, せつかく実用化した遺伝子検査がオーダーメイド医療の実現や社会のバリアフリー対応の改善でなく, 安易に「少数派を異常だと定義し, 「検査で選別・排除し, 「選別された本人に人生の選択肢が狭いことを納得するよう迫る」ためばかりに使われる可能性は, 残念ながらかなり高い。

様々な状況から推測すると, 石原 忍博士は色覚検査表を差別に使うために作成したわけではないらしい。しかし結果として石原表による検査は多くの色盲の人の将来を閉ざし, 日本だけでなく世界中で怨嗟的になってきた。意図が純粋ならば後世の人から怨嗟の対象にはならない, ということはないということである。我々が人類の幸福を願って現在進めているはずのゲノム研究の成果を, 数十年後に同じような怨嗟の対象にさせないためには, 20世紀における色盲差別の歴史と21世紀におけるバリアフリー化の努力は, 貴重な教訓と試金石になるに違いない。

エレベーターを設置したり, 道路の段差をなくしたり, 点字ブロックを設置するといった他のバリアフリーと異なり, 色覚バリアフリーは行政が行う社会基盤の整備を待っていれば進むという性質のものではない。色を用いた日々のコミュニケーション自体がバリアフリーの対象であり, この社会に生きるすべての人が当事者なのである。この点からは, 色覚バリアフリーの推進における最大の障害は, 「これまで見慣れたもの, やり慣れた習慣をあまり変えたくない」

という素朴な感情かもしれない。実際に, 赤と緑の蛍光染色画像をマゼンタと緑に変えた方がよいという提案に対し, 「でも何となく見慣れてない変な色遣いだ。赤と緑のほうが目に馴染んでいてよい」という反応を受けることは少なくない。だが, 現実には困っている人がいることを知ったうえでこれまでの慣例をあえて続けることは, 単なる消極的な反応というには済まされない側面もある。社会基盤を整備するということは, 役所や制度が対応することを待つことではなく, 普通の人一人一人がバリアの存在を認識し, それを除くような行動を, 自分ができることから実践してゆくことなのである。

謝辞 本稿を執筆するにあたり, 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)タムスの田中陽介の各氏から多大な御助言をいただきました。国立遺伝学研究所の山尾文明, 吉森保, 山田琢磨, 岡崎国立共同研究機構生理学研究所の鯉田孝和, 大阪大学の藤田一郎, 京都大学の三上章允, Medical College of WisconsinのJay Neitzの各氏からは貴重な情報やコメントをいただきました。国立遺伝学研究所の池尾一穂, 白木岐奈, 林 茂生(現 理化学研究所)の各氏, オリンパスプロマーケティング(株)の藪内正和(株)北計工業の橋爪慎哉(株)文化総合研究所の橋本知子, 木村麻樹の各氏からは画像や図版を提供していただきました。また, アドビシステムズ(株), オリンパスプロマーケティング(株), カール ツァイス(株), (株)ニコン インステック, 日本パイオ・ラッド ラボラトリーズ(株), ライカマイクロシステムズ(株)の各社から情報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) 今村勤: 日本眼科紀要 (1962) 13: 611-616
- 2) 今村勤: 臨床眼科 (1975) 29: 119-125
- 3) Okajima K, et al: 9th Congress of the International Colour Association, Proceedings of SPIE (2002) 4421: 256-262
- 4) Ichihara YG: Internet Imaging (2001) 4311: 419-426

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。