

色覚の多様性とカラーユニバーサルデザイン

Color Vision Deficiency and Color Universal Design



1966年生。1993年豊橋技術科学大学博士後期課程修了。博士(工学)。現在、豊橋技術科学大学情報工学系にて色彩科学、視覚工学等に関する研究に従事。

中内 茂樹
Shigeki Nakauchi

◀キーワード：色覚異常，カラーユニバーサルデザイン，分光フィルタ

◀KEYWORDS: color vision deficiency, color universal design, spectral filter

ABSTRACT

Most documents or web pages, including figures and graphs, are produced in color in order to attract viewers' attention and/or to help them obtain information. However, using color does not necessarily make documents more accessible to all users, especially those with color vision deficiencies. This article summarizes simulation method of color-vision deficiency for color universal design which helps us to detect color combinations in a given image that would confuse color dichromats.

1. はじめに

地図や公共サイン，ウェブページなど，色を使って伝えたい情報を表現することは実に多い。色は形状と独立に操作でき，容易に情報を付加できるためである。しかしながら，色覚特性によって色の違いの感じ方が大きく異なることは普段あまり意識されない。特に日本人男性の5%とも言われる色覚異常^{*1}は典型的な混同色特性を示し，その場合，色を利用することが必ずしも情報の伝えやすさに結び付かない場合も少なくない。

最近，色覚特性の違いに関わらず，異なる色としてそれらを区別し，誰もが同じ情報を受け取ることができるように配色・デザインするカラーユニバーサルデザインに感心が集まっている。しかし，自分とは異なる色覚特性の人が感じている，色を区別することの容易さ・困難さを，いわゆる色覚理論をベースに理解することと，デザインの現場において体感・実践することの間には，予想以上のギャップがある。そのギャップを埋めるには，色覚シミュレーションが重要な役割を担う。

本稿では，色覚シミュレーションの基本的な考えを概説し，コンピュータシミュレーションに基づく方法，および筆者らが開発した分光学的手法を用いた色弱模擬フィルタについて述べる。

2. 色覚メカニズムと色覚異常

色覚は分光感度特性が少しずつ異なる錐体視細胞（約

420nm, 530nm, 560nm に最大感度を持つ S, M, L 錐体)による光受容に始まる¹⁾。

先天性色覚異常は基本的には錐体（視物質）の欠損で説明される。ここでは，3種類のうち1種類の錐体が欠損した2色覚（dichromatism）について説明する。2色覚は欠損した錐体の種類によって，1型2色覚（protanopia, L錐体が欠損），2型2色覚（deutanopia, M錐体が欠損），3型2色覚（tritanopia, S錐体が欠損）に分類される。

一般にはあまり認知されていないが，2色覚（および異常3色覚）は極めて高い頻度で生ずる。例えば日本の場合，男性の約5%が，また北米あるいは欧州では約8%が色覚異常と言われている²⁾。日本全体でみれば約300万人強もの色覚異常者が生活している計算になり，このことから，いわゆる異常や障害ではなく，色覚の多様性として捉えるべきという考え方，そして，色覚特性に関わらず情報を適切に伝えるカラーユニバーサルデザインの重要性が理解されよう。なお，色覚異常のうち，そのほとんどが1型ないしは2型（総称として red-green color vision deficiency, 赤緑色覚異常と呼ばれる）であり，3型は全体の0.001%程度である。

さて，図1左に示す錐体応答空間において，例えばL錐体の応答のみが変化する色はちょうどL軸と平行な直線を，M錐体の応答のみが変化する場合はM軸と平行な直線を形成する。これら直線に乗る色群はL錐体あるいはM錐体が欠損した色覚には区別できず，全て同じ色に見えることになる。こうした直線を混同色線（color confusion line）と呼ぶ。したがって，2色覚者にとっての色はLMS錐体空間における部分空間である2次元平面上の1点として表されることになり，2つの原色の混色によって，あらゆる色と等色することができる。2

*1 color vision defects に対して色弱，色覚異常，色覚障害など，さまざまな呼称が用いられているが，本稿では日本眼科学会が定めた眼科用語「色覚異常」を用いる。これら呼称については，日本医学会医学用語辞典 (<http://jams.med.or.jp/dic/colorvision.html>) を参照のこと。

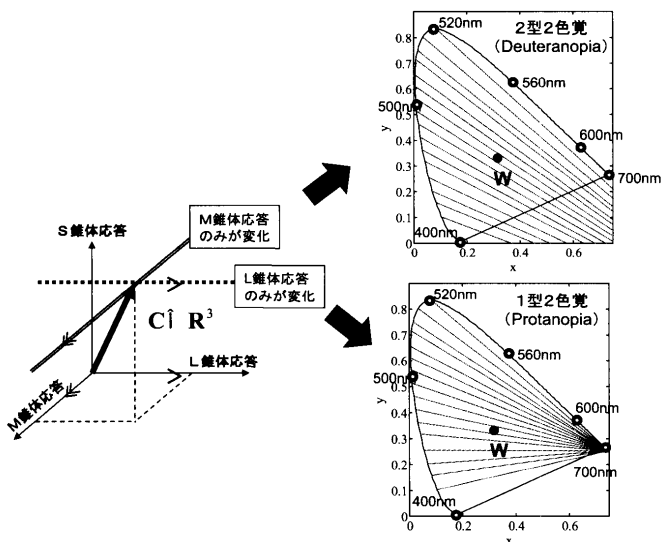


図1 錐体応答空間と混同色線
Fig.1 Cone response space and color confusion line.

色覚者にとって区別できない色を表す LMS 錐体空間の直線は、それと線形関係にある CIEXYZ 色空間においても直線となり、その射影平面である xy 色度図においても直線を形成する (図1右)。

3. 色覚シミュレーションの原理

混同色線によって、対象とする色の色彩値がわかれば、原理的にはそれらが色覚異常者にとって区別しやすいものか、そうでないのか知ることができる。しかしながら、カラーユニバーサルデザインを実践している現場で、一般的なカラー印刷などで使われている膨大な色について、わざわざ色彩計を使って計測することは非現実的である。どの色とどの色が区別しにくいのかを計算によって求め、表示する技術：シミュレーション技術が求められるゆえんである。現在、いくつかの色覚シミュレーション手法が提案されているが、ここでは、比較的わかりやすく、現時点で多くの人に受け入れられている Brettel-Vienot-Mollon の方法²⁾について概説する。

色覚シミュレーションは図1に示した混同色線の理論を基本とする。しかしながら、混同色線からは例えば赤と緑は色覚異常者にとっては同じような色に見えることはわかるが、何色に見えるのかはわからない。この問いに答えるためには、色覚異常者の感じている色を色覚正常者の感じている色、すなわち色彩値に変換する必要がある。Brettel らは以下に示すさまざまな波長の単色光に対する観察事実に基づいて、シミュレーションモデルを提案した。

1. 可視波長帯域の連続スペクトル中に色みを感じない、白色のように見える点 (中性点) がある。
2. 可視波長帯域の連続スペクトル中に色覚正常と色の見え方が変わらない波長がある。

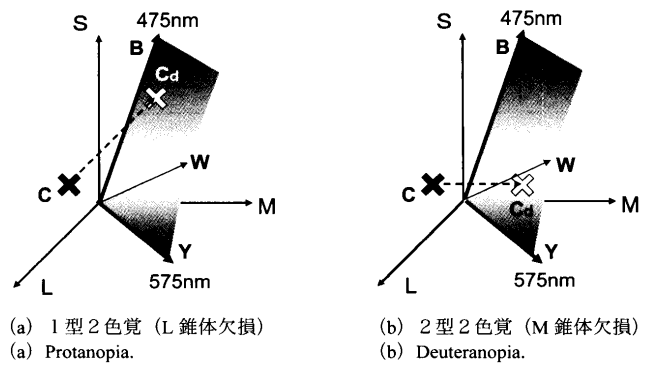


図2 Brettel ら³⁾による色覚シミュレーション
Fig.2 Color vision simulation by Brettel et al³⁾.

このような観察が可能であるためには、色覚異常者の感じた色と「主観的に等価な」色覚正常者が感じる色を見つけなければならない。したがって、「主観的に等価」であることを判断する観察者が、色覚異常者の色と色覚正常者の色を「同時に」感じ、比較することができなければならない。これが可能なのは片眼だけが色覚異常である unilateral color blindness⁴⁾⁵⁾であり、かなり古くからその存在が知られていたようである。先に述べたように、混同色線が意味することはある色とある色が区別できないほど似た色であるということのみであり、それらが何色に見えるかについては一切答えていない。片眼が色覚正常、他眼が色覚異常という観察者の存在によって初めて、475nm あたりの青と575nm あたりの黄が色覚正常の眼と色覚異常の眼で色の見え方が変わらない、といった「色の見え」についての手がかりが得られた。

Brettel らはいくつかの仮定に基づいて、この観察事実を補間するモデルを提案した (図2)。彼らのモデルはまず、LMS 錐体空間において、2色覚者の感じる色の範囲を2次元部分空間 (折れ曲がった平面) として定義する。この平面は色覚正常者と色覚異常者の色の対応が取れている白色 W, 475nm の青 B, 575nm の黄 Y の3つのベクトルによって張られ、この平面上の色は色覚正常者と色覚異常者で同じ色に見えるものと仮定する。その他の色覚正常者が感じる色を表すベクトル C は、全てこの2次元部分空間へ射影されることになり、2色覚者の色ベクトル Cd を得る。この際、射影は混同色線に沿って行い、L 錐体が欠損した1型2色覚に対しては C から L 軸と平行に、M 錐体が欠損した2型2色覚に対しては C から M 軸と平行に射影する。

色覚異常が錐体視物質欠損で説明されることから、しばしば欠損した錐体の応答を単純に0とすればよい、と誤解されやすい。例えばL錐体欠損の1型2色覚の場合、M錐体とS錐体の2軸で張られるMS平面 (すなわちL=0の平面) と考えやすいが、それは誤りである。例えば、単純にL錐体の応答を0とすると、2色覚者も色覚正常者も同様に白色を白色として感じる、という

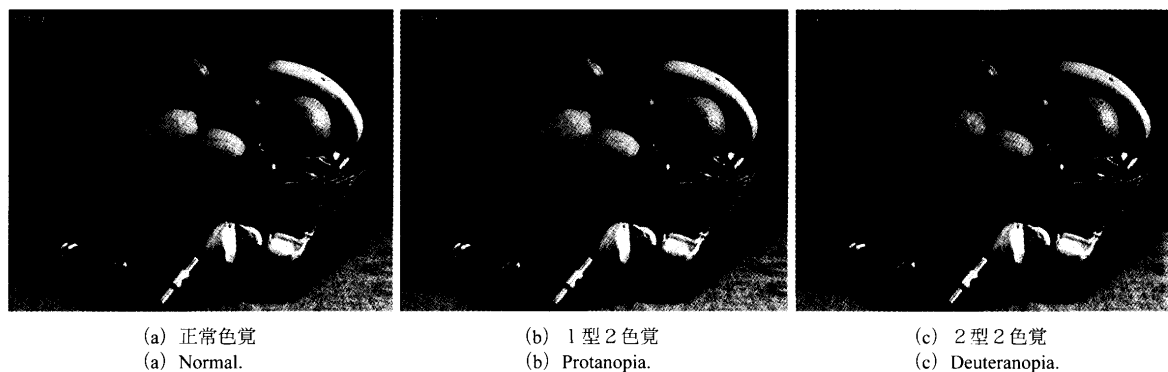


図3 色覚シミュレーションの例

Fig.3 Example of color vision simulation.

現象を説明できない。

図3に色覚シミュレーション例を示す。変換前後の色CとCdは1型、2型それぞれの混同色線上に乗っているため、1型2色覚者にとっては図3(a)と(b)が、2型2色覚者にとっては図3(a)と(c)が区別できないはずである。色覚シミュレーションの精度を確かめる1つの方法は、色覚異常者にシミュレーション前後の画像を観察してもらい、それらがどの程度同じように見えるかという点で判断する方法である。しかしながら、この方法はあくまでも色変換が混同色線に沿って正確に行われているかどうかを判断するものであり、色覚異常の色の見えが正しくシミュレートできているかどうかは、やはり色覚正常者でも色覚異常者でも確認することはできない。

4. 分光フィルタによる色覚異常シミュレーション

さて、カラーユニバーサルデザインを実現する最初のステップは、色覚異常者にとって区別が難しい配色を見つけ出すことにある。したがって、誤解を恐れずに言えば、対象の色そのものが何色に見えるか（赤なのか青なのか）ということは問題ではなく、ある色と色の組み合わせに対して、それらが区別しやすいかしくいかにいう点が重要となる。Brettelらの方法によれば、混同色線の特性は錐体欠損説に従ってシミュレートされており、例えばディスプレイ上に再現された画像を見ながら、色の組み合わせによって色弁別のしやすさが変化する様子を理解するには極めて有効と言える。

ただし、画像を撮影し、ソフトウェアでそれを変換し、ディスプレイ上に表示するという一連の作業が、対象が多くなればなるほど、カラーユニバーサルデザインへの意欲を低下させる程に煩雑と感じさせる可能性がある。また、通常のディスプレイ観察環境であれば、表示された画像以外のモノも眼に入ることになり、いわゆる色覚特性の違いを体感したり、視環境全体をチェックするにはリアリティーに欠ける。

われわれはこうしたコンピュータによる色覚シミュレーションを補完し、カラーユニバーサルデザインの実

践をより強力にサポートするシミュレーションツールとして色弱模擬フィルタ⁶⁾を開発した。このフィルタは色覚正常者がそれを装着することによって、色覚異常者の特性に近づくように装着者の色覚特性を修飾するものである。リアルタイム性、可搬性に優れ、高い没入感が得られるため、色覚異常者の色覚特性（色弁別特性）をよりリアリティーを持って体感することができる。以下、その概要について述べる。

まず、フィルタはどのような働きをすればよいだろうか？錐体視物質欠損説に従って、L錐体あるいはM錐体を働かないようにできるだろうか？図1に示すように、錐体の分光感度特性は特にL錐体とM錐体で非常に似通っており、オーバーラップが大きいので、どんな分光透過特性のフィルタによっても、L錐体のみ、あるいはM錐体のみを0にすることはできない。そもそも、先に述べたように、L錐体あるいはM錐体の応答を0にすることが必ずしも色覚異常を模擬することにはならない。

そこで、Brettelらとは視点を変え、色の見えそのものを模擬するのではなく、任意の2色の間の色の違い（色差）がフィルタを装着した色覚正常者と色覚異常者の間で同じようになるように、フィルタの分光透過特性を設計した。設計手法の概要は次の通りである。まず、さまざまな色光の分光分布セット（ここでは反射物体を対象にしている）に対し、任意の2色の間の色差を色覚異常者およびフィルタを装着した色覚正常者について求めた。色覚異常者の感じる色差は、Brettelらの手法によりシミュレートした色に対して求め、フィルタ装着者については、フィルタを透過した後の色光に対して求めた。次に、フィルタ装着者と色覚正常者の間で色の識別のしやすさがどの程度似ているかを表す評価量を計算し、少しずつフィルタの分光透過特性を変化させながら、最適化を繰り返した。

なお、1型、2型の色覚タイプの違いについては、ツールとしての役割を考えれば、フィルタを装着した色覚正常者にとって、1型2型いずれかの2色覚者にとって区

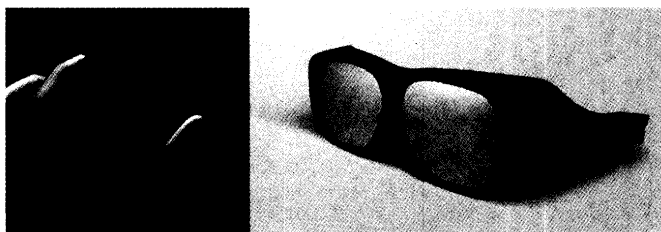


図4 色弱模擬フィルター (左) と眼鏡タイプ実装 (右)
Fig.4 Dichromat simulation filter (left) and spectacles (right).

別しにくい色を、区別しにくいと感じることができればよい。すなわち、このフィルタを装着して区別しにくい配色は1型ないしは2型の色弱者が区別しにくいものである、と判断できるツールとなるように設計した。具体的には、評価量としてカラーユニバーサルデザインのツールとしての性能を表す次の2つの量を考え、これらの値がともに最小となるようにフィルタの分光透過特性を設計した。

1. 見逃し率 (Miss)

フィルタを装着した色覚正常者が識別できると判定した配色が、1型“あるいは”2型2色覚者にとって実際は識別困難である割合。

2. 過剰警告率 (False Alarm)

1型“および”2型2色覚者にとって識別できる配色に対して、フィルタを装着した色覚正常者が識別困難と判断する割合。

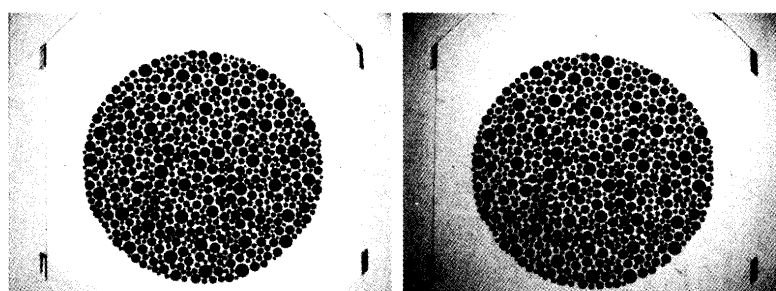
なお、上記条件に加えて、色覚異常者と色覚正常者はともに白色を白色と感じるという点を重視し、白色の見え方がフィルタ装着によってできるだけ変化しないように配慮した。

こうして設計した分光透過特性に基づき、多層薄膜技術によって実現した光学フィルタを眼鏡タイプとして作成・実装した (図4)。実際に作成したフィルタの分光透過特性は理論設計にほぼ一致し、上記評価量に関しても見逃し率は3%以下、過剰警告率はほぼ0%であった。その他、色覚検査で用いられる石原色票やパネルD15テストなどにより、色覚正常者がこの眼鏡を装着することによって、高い精度で色覚異常の色弁別特性を再現できることを確認している。なお、本フィルタは「バリエントール (Variantor)」として既に商品化されている⁷⁾。

フィルタをデジタルカメラ前面に装着して撮影した画像を図5に示す。図5上段は石原色覚検査表を撮影したものであり、左はフィルタを装着していないもの、右は装着後の撮影画像である。この色票は色覚正常者には中央部に数字の「8」が確認でき、色覚異常者には別の数字「3」と読める (あるいは全く数字が読めない) ように配色されたものである。撮影画像からも確かに左は「8」、右は「3」の数字を確認することができる。

図5下段に示した例は、ピンク色の点字ブロックであり、筆者が2型2色覚の学生と街を歩いているときに偶然、見つけたものである。筆者がその学生にピンク色の点字ブロックについて尋ねたところ、彼がその存在になかなか気付かなかったところから、この配色に問題があることに気がついた。フィルタを通して確認したところ、図5に示すように、ピンク色はグレーに見え、確かに背景と区別しにくいものであった。こうしたことは、ここに示した例に限らず、少なからず存在する。学生にとっては、点字ブロックはグレーであると思っており、筆者はピンクであると思っている。問題の焦点はそれぞれの

(a) 石原色覚検査表



(b) 点字ブロック

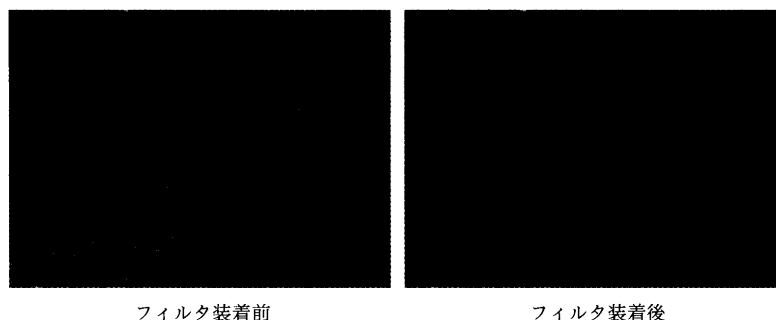


図5 色弱模擬フィルタによる効果例
Fig.5 Appearance through dichromat simulation filter (Variantor).

頭で感じている色をお互いに比較できないことにある。

5. おわりに

本稿ではカラーユニバーサルデザインの実践をサポートする色覚シミュレーション技術について述べた。カラーユニバーサルデザインの重要性は指摘されつつ、いまだその普及が十分でない原因の1つに、問題そのものが十分認知されていないことを挙げる事ができよう。色覚特性の異なる人がどのような色彩世界を感じているかを知ることは容易ではなく、配色に問題があるかどうか、改善する余地があるかどうかを、色覚正常者および色覚異常者の間でコミュニケーションをとることは根源的な問題であり、難しい。本稿で紹介したようなコンピュータによる色覚シミュレーションはカラーユニバーサルデザインを実践するうえで強力なツールとなるであろう。

一方、カラーユニバーサルデザインそのものを十分に知らない人にとっては、色弱模擬フィルタは問題に気付くよいきっかけを与えるものと考えている。本フィルタは色の見分けの状況を没入感の高い状況でリアルタイムに体験できること、また極めて可搬性が高いことから、カラーユニバーサルデザインの裾野を広げるうえで画期的な技術であろう。最近では、1型と2型を個別に模擬するフィルタも開発・販売を開始しており*²、より詳細な色覚特性のシミュレーションにも利用できるようになってきている。

なお、いまだ研究段階ではあるが、色覚シミュレーションのみならず、ほぼ自動的に色覚異常者にとって区別が困難な配色を見つけ出すとともに、それらを色覚正常者、色覚異常者の双方にとって区別が容易な配色へと修正する手法についても提案されている⁷⁾⁸⁾。今後ますます色

情報が求められる状況において、全てをシミュレーション結果等の目視によってチェックするのは非常に難しくなることが予想される。したがって、この種のサポートツールの開発は今後ますます重要になるものと考えられる。

参考文献

- (1) Stockman, A., MacLeod, D.I.A. and Johnson, N.E. : Spectral sensitivities of the human cones, *J.Opt.Soc.Am.A*, 10, pp.2491-2512 (1993).
- (2) Sharpe, L.T., Stockman, A., Jagle, H. and Nathans, J. : Opsin genes, cone photopigments, color vision, and color blindness, In: *Color vision: from genes to perception*. Gegenfurtner K.R., Sharpe, L.T. eds., New York: Cambridge University Press, pp. 3-51 (1999).
- (3) Brettel, H., Vienot, F. and Mollon, J.D. : Computerized simulation of color appearance for dichromats, *J.Opt.Soc.Am.A*, 14, pp.2647-2655 (1997).
- (4) Judd, D.B. : Facts of color-blindness, *J.Opt.Soc.Am* 33-6, pp.294-307 (1943).
- (5) Judd, D.B. : Color perceptions of Deuteranopic and Protanopic observers, *J.Res.Natl.Bur.Stand. U.S.A.*, 41, pp.247-271 (1948).
- (6) Miyazawa, K., Onouchi, T., Oda, H., Shinomori, K. and Nakauchi, S. : Functional spectral filter optically simulating colour discrimination property of dichromats, *Perception*, 35, pp.197-198 (2006).
- (7) Rasche, K., Geist, R. and Westall, J. : Detail preserving reproduction of color images for monochromats and dichromats. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 25, pp.22-30 (2005).
- (8) Nakauchi, S. and Onouchi, T. : Detection and modification of confusing color combinations for red-green dichromats to achieve a color universal design, *Color Res. Appl.*, 33-3, pp.203-211 (2008).

連絡先

愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1
1-1 Hibarigaoka Tempaku Toyohashi
E-mail : nakauchi@tut.jp

*2 <http://www.variantor.com/>

本原稿に関する口絵は、163ページに掲載されております。