

シリーズ：著者が書く“論文活用マニュアル”〈第2回〉

色発現の三要素（その2）— 視覚系の色順応 —

Three elements for color production (2) —Color adaptation of visual system—

篠田 博之 Hiroyuki Shinoda

立命館大学情報理工学部知能情報学科

Dept. of Human and Computer Intelligence, Ritsumeikan University

1. はじめに

身の回りのすべての物には色があります。白、黒、灰色のような無彩色も色のバリエーションのひとつです。色のない視覚体験はありません。また色はさまざまな方法で作られます。染色、顕色、油性、着色、発色、彩色、設色、催色、褪（退）色、脱色、潤色、調色、混色。これらはいずれも色を作る、あるいは操作することを意味する言葉です。色を選択し配色することも色を扱うことに変わりはありません。最近では誰でもパーソナルコンピュータ（PC）と適当なソフトウェアを用いれば、ディスプレイ上に思い思いの色を作り出すことができます。その色をプリントアウトすることもできますが、ディスプレイ上の色と合わずに苦労したことはありませんか。実は産業界の生産・流通において、色彩は管理するのが最も難しい属性とされています。色は光によって生じる感覚です。正しく扱うためには、物理、生理、心理といった複数の領域にわたる知識が必要です。色彩に関する最先端の研究や教科書で紹介される理論は、皆さんが実際に色を扱う際に役立っているのでしょうか。この解説では色を思い通りに扱うために有用な考え方やアイデアをご紹介します。今回はそのシリーズの二回目です。前回は色発現の三要素と色の物理的な側面に絞って色を扱いましたが¹⁾、今回は視覚系の色順応や色の見えのモードに着目して色を考えます。

2. 色発現の三要素と照明光への順応

色発現には光（照明）、物体、観察者といった三つの要素が必要です（色発現の三要素）²⁾。照明は物体を照らし目に入射する光の分光組成を決定します。前回はこの点に着目し、光源のスペクトルを変えることで色を操作しました。図1では実線の矢印で表現しています。照明光は物理的に反射光のスペクトルを決定するだけでなく、観察者の視覚系に作用することでも

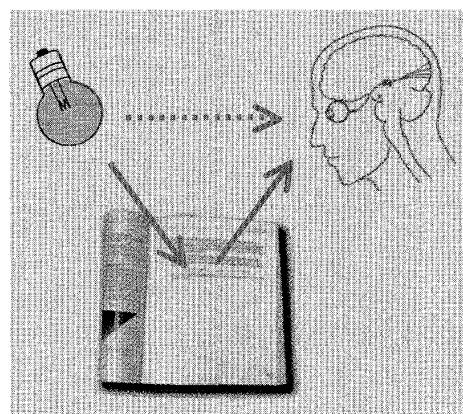
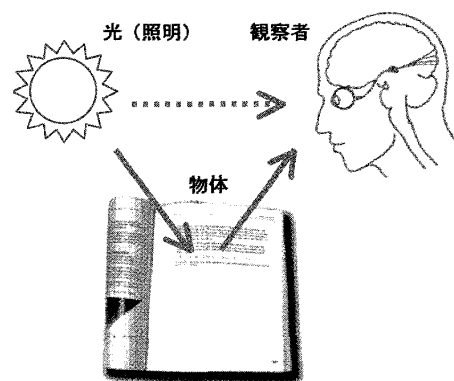


図1 色発現の三要素と反射物体の色恒常性

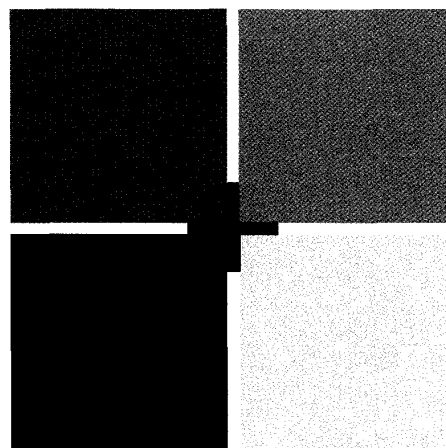


図2 (a) 色順応による色残像と継時色対比
中央の十字を見つめた後に目を動かさずにp.229の図2 (b)を見る
(詳細は本文参照)

色覚に影響を与えます³⁾。図では照明光が順応を通して色に影響する様子を点線で表しています。

順応はどのように色の知覚に影響するのでしょうか。一般に順応は環境や刺激への「適応」と「慣れ」を意味します。視覚系に限らずあらゆる感覚系において慣れるとは、同じ刺激を受け続けることにより反応が弱くなること、感度低下とも言えます。例えば赤色を見続けているとその色（赤）に慣れ、その色（赤）の感覚が鈍ります。色覚の場合に面白いのは、ある色の感度低下はその反対色の感度上昇に相当することです。視覚系には赤緑、黄青といった二つの色感覚が拮抗して知覚される反対色応答があるためです⁴⁾。したがってある色を見続けた後に無彩色を見るとその反対色を知覚することになります。これは色残像や継時色対比という現象ですが、いずれも色順応の副産物だったのです³⁾。図2のデモを試して下さい。図2(a)を見続けた直後、次頁の図2(b)の灰色が反対色に見えるはずですが、図2(a)と(b)を同じ場所に配置していますので、図2(a)の中央の十字を目を動かさずに10秒から20秒間見つめ、その後にページをめくって下さい。ページをめくってもしばらくは目を動かさないように。見つめている間、まばたきは何度しても結構ですが頭と目を動かさないことがコツです。黄のあった場所には青、逆に青の場所には黄、赤の場所は緑、緑は赤になりますね。

3. 色順応と物体表面の色恒常性

照明光へ色順応する目的は何でしょう。それは色の恒常性のためであり日常不可欠な機能なのです³⁾。照明光の色が変わっても物体表面の色は一定に保たれる。これが色恒常性です。図1のように、低色温度の照明光で白い紙を照明する場合を例に説明します。低色温度の照明には長波長の光が多く含まれます。白い紙の表面はどの波長も等しく高反射率で反射するため、紙からの反射光も長波長成分を多く含む黄色い光です。もしこのまま目に入射する光の色を判定すると「黄色い紙」と知覚されてしまいます。ところが視覚系は黄色い照明光に色順応していますので、黄色に対する感度が低下しています。したがって目に入射した光は黄色ではなく「白い紙」と知覚されるのです。他の色の物体表面でも同じです。また他の色の照明光の場合でも、よほど極端な色でなければ、照明光へ色順応のおかげで物体表面の色が安定して知覚されます。

この色順応を考慮しないと、せっかく照明光のスペクトルを操作しても物体の色演出が上手くいきません。鮮魚や精肉向けの照明を例に説明します。肉を新鮮に見せようと図3(a)のように長波長光を多く含む照明光で部屋全体を照明したとします。確かに肉からの反射光には長波長光が多く含まれます。しかし同じ照明光が観察者に届き、視覚系は赤い光に色順応してしまいます。すると赤に対する感度が下がり、肉からの反射光はそれほど赤いと判断されず、失敗に終わります。実はこれこそが色恒常性なのです。一方、図3(b)では赤い照明は肉だけを照らし、観察者側には通常の白い（無色）の照明を施しています。これだと赤への色順応はおこらずに反射光の波長組成の通りに赤いと判断されます。これは色恒常性を成立させないテクニックで、前回解説¹⁾の図4で説明を省略した「照明光の分離による色順応の排除」に相当します。

4. 自発光ディスプレイにおける色恒常性不軌

最近ではテレビやPCディスプレイ、携帯電話やスマートフォンのディスプレイなど、自発光の色が身の回りにたくさんあります。反射物体であれば色恒常性が成立しますが、自発光の色では、逆に色順応のせいで知覚色が一定に保たれないという問題を起こします³⁾。図4のようにディスプレイは自ら光を発しています。

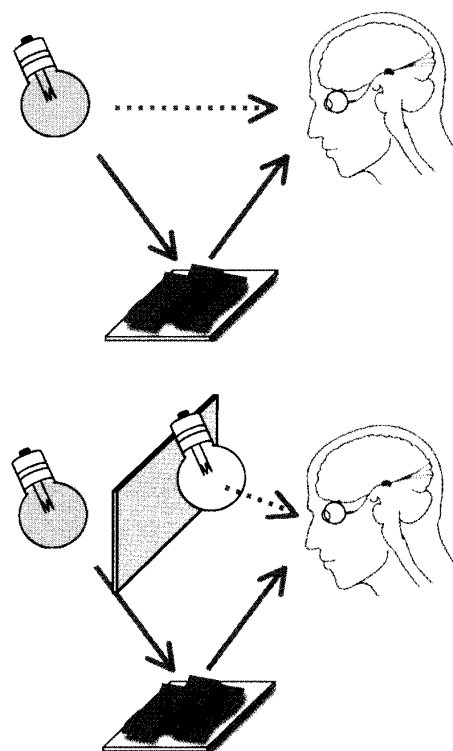


図3 照明光の分離による色順応の排除

すので、物理的には照明光に関係なく一定の光が目には届きます。しかし視覚系は照明光に色順応して常に感度調節をするため、照明光とは反対色の方向に色の見えが変化してしまいます。例えば、どの波長もほぼ均等に含むニュートラルな光がディスプレイから放射されていても、低色温度の照明下では無色には見えず、黄に色順応した視覚系には照明の反対色である青みがかった色に知覚されます。照明光から独立しているがゆえに、色順応した視覚系からは、色がずれて見えるのです。

この色の変化はかなり強力です^{5, 6)}。Ikeda *et al.* (2002) の実験⁵⁾ では、図5の色度図に示す $I_1 \sim I_8$ の照明下で奥壁の開口Aから呈示される色を観察し、そのときの色の見えをエレメンタリーカラーネーミング法により測定しました。リアスクリーンSにはプロジェクタPからの光が当たっていますので、開口から呈示されるテスト刺激Tは照明光FLからは独立しており、FLの色によらず一定に保たれます。Tの色は色度図に示されるように無彩色で、暗黒中で観察すれば白色に見えます。物理的には開口から洩れてくる光ですが、その輝度は十分に低く設定され、観察者には壁面に貼付けられた色票のように見えます。つま

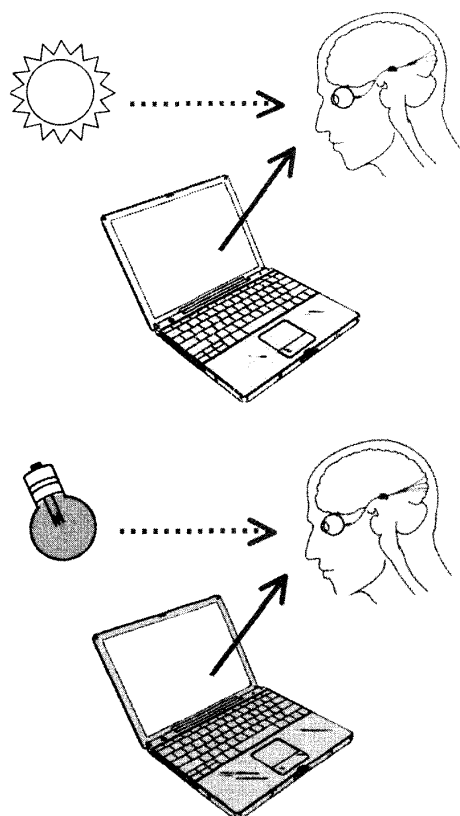


図4 自発光ディスプレイにおける色恒常性不軌

りテスト刺激Tはあたかも自室の照明FLで照明された物体として認識されるよう工夫しているのです。普通であれば白に見える色なのに、自室の照明の色を変えることで、照明光とはほぼ反対色の色相を帯びて見え、色み (colorfulness) が30～80%にも達する結果となりました。

これは驚くべきことです。この効果を利用すると、観察者側の照明を操作して対象物の色の変化を面白く演出が可能になります。先ほどの鮮魚、精肉の照明においても、観察者側を白色（無色）と言わず、青や緑の照明にしたらどうなるでしょうか。肉はより強い赤色になりますね。もしかしたら肉への赤い照明は不要になるかもしれません。先日訪れた台湾でこのような照明を体験しました。台北101という高層ビル最上階の土産物屋の展示です。売物の珊瑚には赤っぽい照明が、そして客のいるフロアは海をイメージしているのか青い照明が施されていました。当然、珊瑚はきれいな赤やピンクに見えました。しかし手で筒を作って青い照明を制限して珊瑚だけを観察すると、赤みはぐっと落ちてしまいました。色覚に詳しい人がアレンジしたのか、それともたまたまなのか。真相は分かりませんが、思わずニヤリと笑ってしまいました。

5. 色発現の物理条件と色の見えのモード

しかし色順応により色の変化するのは、あくまでも自室の照明によって照らされた物体表面と認識されるときのみ。言い換えると「物体色モード」、「表面色モード」⁷⁾ のときのみです。図5のプロジェクタの光を強くすると、テスト刺激Tはもはや壁面上の色

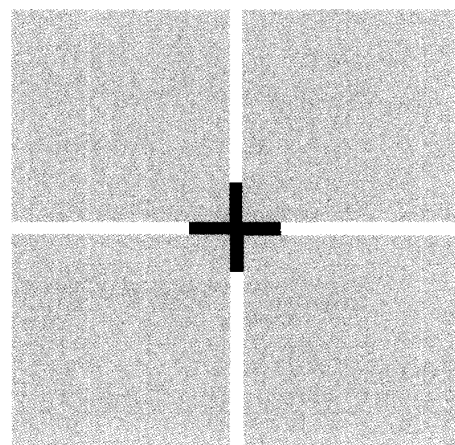


図2 (b) 色順応による色残像と継時色対比
(詳細は本文参照)

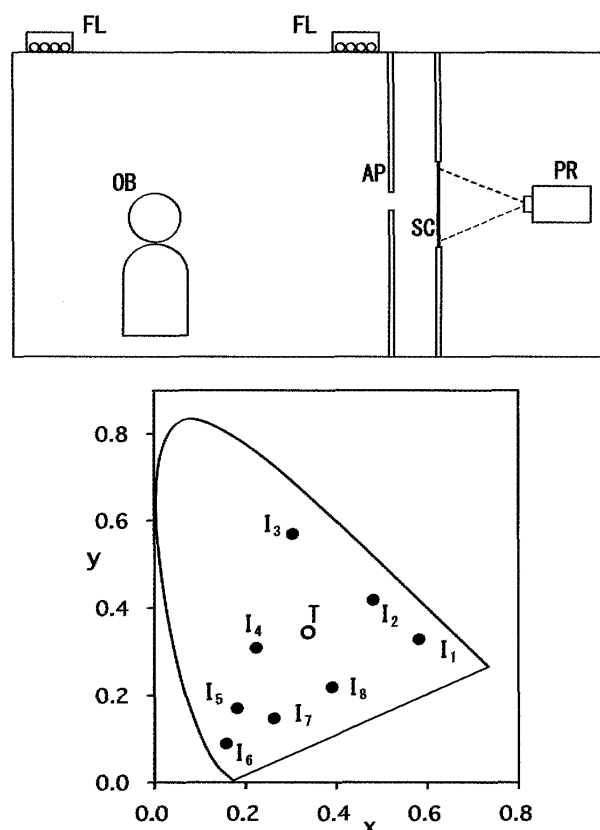


図5 照明光への色順応による色知覚への影響
(Ikeda et al. 2002)

FL, 蛍光灯照明; AP, 開口; OB, 観察者; SC, スクリーン; PR, プロジェクタ; T, テスト刺激 (AP) の色度; I_1 – I_8 , 照明光 (FL) の色度

票のような反射物体とは認識されません。部屋にある物体よりも明るく、光源から発せられる、あるいは開口を通して洩れてくる光のように、自室の照明光から独立した色として認識されます。この状態を「光源色モード」, 「開口色モード」⁷⁾と呼びますが、このときには照明光への色順応が起きても色の見えは変化しません。テスト刺激の物理的な分光組成によって決まる色、この実験の場合は白色のままなのです。

色は現象学的、つまり見え方からも分類され、「モード」という語を用いて物理的な成立条件による分類と区別します⁷⁾。表1に、色発現の物理的条件と色の見

表1 さまざまな色の物理条件と見えのモードにおける色恒常性²⁾

		色発現の物理条件	
		反射物体 照明光に依存	自発光 照明光から独立
色の見えの モード	物体色 モード	[A] 色恒常 通常の色恒常	[B] 色変化 照明と反対色方向へ変化
	光源色 モード	[C] 色変化 照明と同色方向へ変化	[D] 色恒常 分光組成で決定される色

えのモードの観点から色恒常性の成立・不成立を整理しました²⁾。物理的な反射表面を物体色モードとして認識する場合は[A]で、いわゆる通常の色恒常性が成立します。照明光と独立な光を発する刺激が光源色モードとして認識されれば[D]で、刺激の分光組成のみで色は決まります。照明光から独立した刺激でも物体色モードとして認識されれば[B]となり、照明光とは反対色方向に色の見えが変化します。[C]は現実的にはあまり存在しない条件ですが、理論的には照明と同色方向の色変化と推定されます。このように、色の物理的条件と見え方による分類（色の見えのモード）を意識することは非常に有益です。とくに次節のカラーマネジメントだけでなく、照明を用いた色演出においてもおおいに役立つはずで

6. カラーマネジメントとその問題点

PCの普及に伴い色を扱う機会が増えました。しかしディスプレイ上の色をプリンタで印刷しようとして実感するように、異なるデバイスに同じ色を再現するのは難しいことです。これを実現しようとするのがカラーマネジメントシステム (CMS) です。多くのディスプレイでは赤 (R)、緑 (G)、青 (B) の三原色の強度を変えて混色し様々な色を作り出します。しかしブラウン管 (CRT) や液晶などの方式、またメーカーや機種、さらに厳密に言うと同じ機種でも個体によってそのRGB原色の色と明るさは異なります。したがって同じ (R, G, B) 値*を入力してもそれぞれのディスプレイ上の色は同じになりません。同じ色を実現するには色データ (R, G, B) を適切に変換する必要があります。その際、個々のディスプレイ間で色変換をすると、その数だけ変換式が必要となり非効率的です。そこで多くのCMSはCIE XYZやCIE LABなどのデバイスに依存しない色空間を経由して色変換する方式を採用しています (図6)。この方式ならそのデバイス自身の色空間 (R, G, B) と (X, Y, Z) の間の変換式または対応表だけで済むからです。

しかしこの方式にも問題点があります。主なものを以下の3つに整理します。

1. デバイスの較正あるいはそのための測色機器が必要
2. CIE XYZやCIE LABなどの測色値はユーザ個

* 以下の議論でのR, G, Bはデバイス色空間の値です。CIE RGB表色系のR, G, Bとは異なることに注意して下さい。

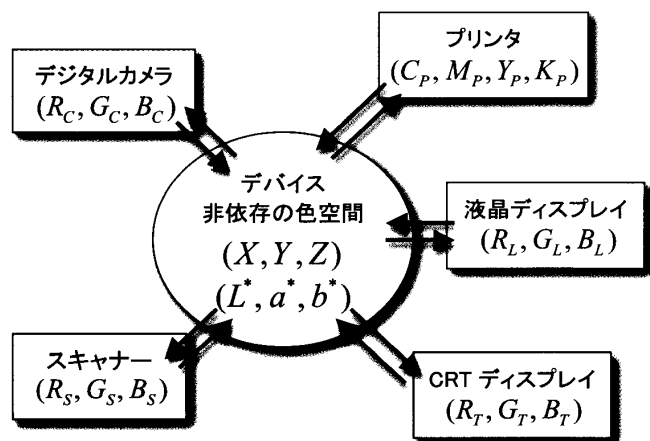


図6 デバイスに依存しない色空間を経由するカラーマネジメント

人個人の色の見えを保証しない

3. 測色値が同じでも自発光ディスプレイでは照明により色の見えが変化する

一つ目は問題点というよりCMSには当然必要なことです。しかしすべてのディスプレイが適切に校正されているとは限らず、まして高額な測色機器を用いてユーザ自身が校正することは現実的ではありません。二つ目は意外と知られていないことです。CIE XYZ表色系やCIE LAB均等色空間は標準観測者の感度（正確には等色関数）により定義されています。そしてそれは個人個人の感度と厳密には一致しません⁸⁾。つまり (X, Y, Z) を合わせてもそれぞれのユーザに見える色は異なるのです。同一物のようにまったく同じ分光組成（スペクトル）であれば誰にも同じ色に見えます（完全等色）。しかし分光組成が異なっている場合でも同色に見えることがあります（条件等色）。反射物体である色票の色をディスプレイ上に再現する状況がそれに相当します。このときに個人差がでます。ある人にとっては同色でも他の人にとっては異色に見える可能性があるのですが、後ほど実例を示します。三つ目は自発光ディスプレイ特有の問題で前節と前々節で説明した内容です。

7. 色恒常性を利用した自発光ディスプレイのカラーマネジメント

これまでカラーマネジメントに関して色々取り組んできました。撮影時の実空間での色印象を写真に忠実に再現するための色変換や観察条件⁹⁻¹²⁾、異色照明下で同じ色の実現するためのVon Kries色順応モデルに基づくCMS^{13, 14)}などです。本稿ではより直接的に上記の問題を解決する自発光ディスプレイのカ

ラーマネジメント手法¹⁵⁻¹⁷⁾を紹介します。図7に示すように、照明、ディスプレイ、観察者が異なる複数の条件を想定します。例えば条件Nと条件Aのディスプレイの色データをそれぞれ (R_N, G_N, B_N) 、 (R_A, G_A, B_A) とすると、次式のように 3×3 行列 m_{NA} により色変換して同じ色を実現することがカラーマネジメントの最終目標です。

$$\begin{pmatrix} R_A \\ G_A \\ B_A \end{pmatrix} = m_{NA} \begin{pmatrix} R_N \\ G_N \\ B_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 & a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 & a_5 \\ a_6 & a_7 & a_8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_N \\ G_N \\ B_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 R_N + a_1 G_N + a_2 B_N \\ a_3 R_N + a_4 G_N + a_5 B_N \\ a_6 R_N + a_7 G_N + a_8 B_N \end{pmatrix}$$

もし (X, Y, Z) が等しくなるような色変換行列を求めれば図6の既存のCMSになります。しかしここでは物体表面の色恒常性を利用して異なる二条件を結びつけます。照明の色が変化しても物体表面の色は保たれるため、同じ色票を用いてディスプレイの色を視感等色すれば、どの環境でも同じ色の実現を保証したことになると考えたからです（図7）。校正に測色機器による測定は不要です。ユーザ自身の目で観察して色票と同じ色になるようにディスプレイの色を調整するだけです。そうすることにより、自動的にディスプレイ個体差とユーザの個人差、さらには照明に対する色順応も校正に反映されます。上式で分かるように、1種類の色票を色合わせすれば3つの方程式が得られます。 m_{NA} の9つの成分 $(a_0 \sim a_8)$ を求めるには9つの連立方程式を解けばよいので、原理的には3枚の色票に対する視感等色から色変換行列が求まります（実際は複雑な数学手法を用いて3枚以上の色票の等色結

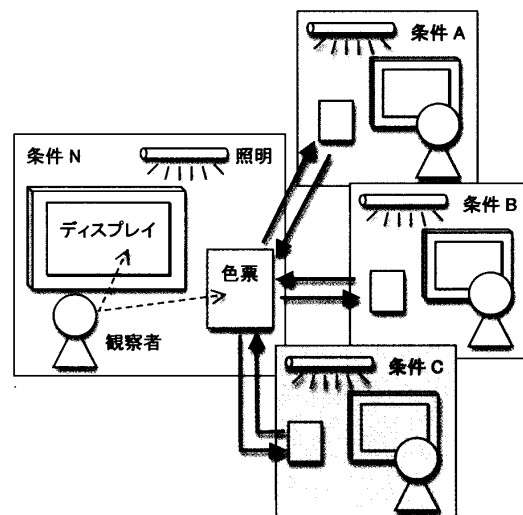


図7 物体表面の色恒常性を利用したカラーマネジメント

果から m_{NA} を導出)。

実際の等色実験の結果とカラーマネジメントの例を示します¹⁷⁾。携帯電話 (docomo PRIME series N-01A) のディスプレイを用い、D65光源下とA光源下において5種類のマンセル色票 (5R 6/6, 5Y 6/6, 5G 6/6, 5B 6/6, 5P 6/6) と視感等色しました。観察者は2名です。等色結果の一例としてこのディスプレイの (R, G, B) の値を示しますが、図8には (R, G, B) ではなく色度 (r, g) に変換して表示しました。色度は次式で計算されるように (R, G, B) の割合なので、純粋な R, G, B の色度はそれぞれ $(r, g) = (1, 0)$, $(0, 1)$, $(0, 0)$ になります。その座標を目安に、色度から色を想像しながら結果を見て下さい。

$$r = \frac{R}{R+G+B}, \quad g = \frac{G}{R+G+B}, \quad b = \frac{B}{R+G+B}.$$

観察者間で等色結果がかなり異なっています。条件等色の特徴が見事に現れました。つまり同じ反射物体の色をディスプレイ上に表現するには、観察者によって異なる (R, G, B) にする必要があるのです。本手法で

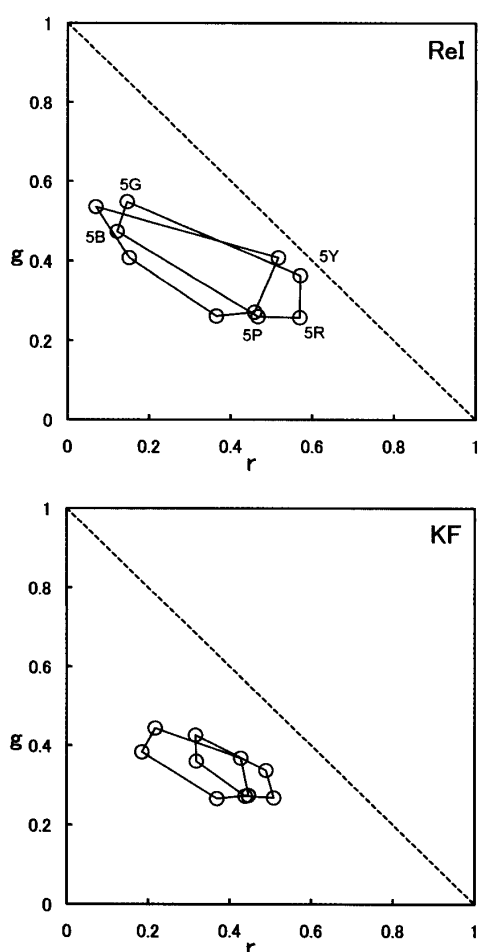


図8 携帯電話ディスプレイの等色実験結果の例
観察者 Rel と KF の等色結果 (青, D65 光源; 赤, A 光源)

はそれぞれの観察者が視感で等色していますので、得られる色変換行列には個人差も反映されています。D65とAの照明の違いに対してはどちらの観察者も同じ傾向を示しています。D65光源下に比べてA光源下の等色結果は右方向 (黄赤方向) にずれています。つまりD65光源下の色票と等色した (R, G, B) をそのままA光源下で呈示すると、A光源下の色票に比べて青緑みがかって見えてしまうことになります。逆に、色票と同じ色に見えるようにするには全体的に黄赤方向にずらす色変換が必要になります。

得られた変換行列を用いてカラーマネジメントを施した例を図9に示します。A光源下で観察するディスプレイ上に、D65光源下で見たディスプレイの色を再現するための色変換です。図9はあくまでもイメージを持ってもらうためで、厳密ではありませんが、かなり黄色い画像になります。しかしA光源下でその照明に色順応した状態で観察すれば、D65光源下で見る色票と同じ色に見えるのです。同様にあらゆる条件間でカラーマネジメントが可能です。ある条件を標準条件と決め、その標準条件への色変換行列だけを求めておけば、あとはどの条件間の色変換行列でも計算することができます。例えば図7の条件Aから条件Cへの色変換行列 m_{AC} は条件Aから条件N (m_{AN})、さらに条件Nから条件Cへの行列 (m_{NC}) を掛ければ $m_{AC} = m_{NC}m_{AN}$ と得られます。以上の方法を用いれば、あらゆるディスプレイ、照明環境、観察者によらず、同じ色の見えを提供できます。厳密に言うと、全く同じ色の見えかどうかは分かりませんが、少なくとも反射物体と同程度の色恒常性を提供することが可能です。そして較正に高額な測色機器は必要ありません。全く同じ色票を持っていれば良いのです。

8. おわりに

今回は色覚研究や色彩工学の内容としてはかなりや

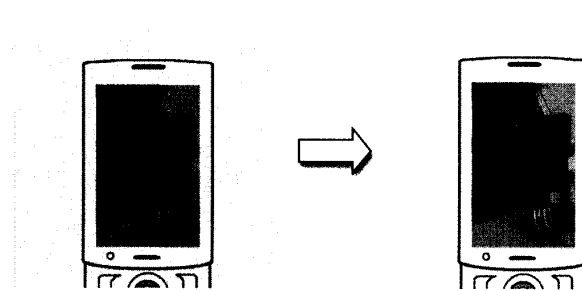


図9 A光源下でD65光源下の画像の色の見えを再現する色変換

やこしい話をしました。色順応，色恒常性，色の見えのモードなど，いずれも実際に体験しないと分かりにくい内容です。紙面でどれだけ理解して頂けたのか自信がありません。また後半のカラーマネジメントも工学的，数学的に厳密な話ができませんでしたので隔靴搔痒の感もあります。次回は観察者の特性に焦点をあてて，高齢者や色覚異常など，色覚のバリエーションや個人差に対応するために有用な考え方や技術を紹介します。

参考文献

- 1) 篠田博之：色発現の三要素（その1）－照らす光と照らされる物体－，日本色彩学会誌，35-2（2011）113-117
- 2) 篠田博之，藤枝一郎：色彩工学入門，森北出版，東京（2007）22-23（色発現の三要素）
- 3) 篠田博之，藤枝一郎：色彩工学入門，森北出版，東京（2007）65-71（色恒常と色順応）
- 4) 篠田博之，藤枝一郎：色彩工学入門，森北出版，東京（2007）50-52（反対色応答）
- 5) M. Ikeda, Y. Mizokami, S. Nakane, and H. Shinoda: Color appearance of a patch explained by RVSI for the conditions of various colors of room illumination and of various luminance levels of the patch, Optical Review, vol. 9, No. 3 (2002) 132-139
- 6) S. Phongbangly, M. Ikeda, and H. Shinoda: The color constancy of light source color mode on a mobile phone display, Proc. of AIC2003, Bangkok (2003) 204-208
- 7) 篠田博之，藤枝一郎：色彩工学入門，森北出版，東京（2007）59-62（色の見えのモード）
- 8) 篠田博之：色空間の選択と変換方法，日本色彩学会誌，33-4（2009）340-346
- 9) M. Ikeda, Y. Hattori, and H. Shinoda: Color modification of pictures requiring same color impression as real scene, Optical Review, vol. 9, No. 6 (2002) 282-292
- 10) 服部佑子，池田光男，篠田博之：色彩画像の忠実な認識のための観測条件，日本色彩学会誌，24-Suppl. (2000) 8-9
- 11) 河田州広，服部佑子，池田光男，篠田博之：様々な景色の色印象を再現するための写真の修整，日本色彩学会誌，25-Suppl. (2001) 52-53
- 12) 吉田和之，河田州広，池田光男，篠田博之：景色の色印象再現のための写真サイズと色補正量の関係，日本色彩学会誌，27-Suppl. (2003) 18-19
- 13) 山川隆亮，篠田博之：種々の照明下における Von Kries 色順応係数の測定，日本色彩学会誌，29-Suppl. (2005) 104-105
- 14) 太田知志，篠田博之：空間認識による Von Kries 色順応係数への影響，日本色彩学会誌，29-Suppl. (2005) 106-107
- 15) 石橋諒一，篠田博之，山口秀樹，キチローラッタナカセムスク：色恒常性に基づく測色機器を用いないカラーマネジメント，日本色彩学会誌，33-Suppl. (2009) 38-39
- 16) 篠田博之，石橋諒一，山口秀樹，キチローラッタナカセムスク：カラーマネジメントシステム及びプログラム，特願2009-118894（2009）
- 17) 古川幸司，篠田博之，山口秀樹：色恒常性を利用した携帯電話ディスプレイのカラーマネジメント，平成22年度日本色彩学会関西支部大会予稿集（2011）28-29