

デバイス・インディペンデント・カラー

矢口博久

最近の新聞広告にバーチャルモールというものが出ていた。インターネットを利用して、あるホームページを開くと、そこにショッピングモールがある。例えば、家具売り場でソファを買いたい場合、希望する形や色を選択するとそれがモニター画面に現れる。次から次へと色々な家具が見られるようになっていそうである。売り手のほうも、家具を並べる膨大なスペースがいらないし、消費者もわざわざ出かけていく必要がないので、便利であるという。さて、このようなバーチャルモールで買い物をした場合、家に届いた製品が、果たしてモニター画面から想像していたものと同じものであろうか。色は想像していたものだろうか？ このような状況で、想像どおりの色を再現するのは非常に難しい問題である。もし分光分布を一致させて物理的に同じ色を出せたとしても、環境によって色の見え方が変わってしまうからである。したがって、色の見えを再現する方法が望まれることになる。色は最終的には人間が知覚するものであって、物理的記述だけでは不十分で、人間の知覚特性に基づいた色の見えを記述する方法が必要となってくる。この方法に基づけば、その色がどのような画像機器によって再現されているかには全く依存しないことになるので、デバイス・インディペンデント・カラーと呼ばれる。

さて、画像システムは、図1¹⁾に示すように、入力系、処理・伝送系、出力系の3つで構成される。入力系の画像機器には撮像管を用いたテレビカメラ、CCDを用いたビデオカメラ、デジタルカメラ、スキャナーなどがあり、それからの信号が処理・伝送系を経由して、

画像出力機器であるCRTディスプレイ、液晶ディスプレイ、カラープリンターなどに表示される。このように入力系にも出力系にも様々な画像機器があるが、その原理、方式が機器によってそれぞれ異なり、機器特有のものである。したがって、処理・伝送系は用いる入力画像機器あるいは出力機器に依存したものになってしまう。1つの画像入力機器に1つの画像出力機器が対応しているような場合には、このような機器に依存した画像システムでも問題は生じない。しかし、図2に示すように、ネットワーク上を入力機器、出力機器関係なく種々の画像機器が接続され、お互いに色情報をやり取りする場合には、機器に依存しない色情報（デバイス・インディペンデント・カラー）を導入する必要がある。ここで画像入力機器の役割を考えると、それは取り込もうとしている画像がどのような色であるかという色の解析を行うことである。そこで、色の解析を人間の色知覚特性に基づいた方法、つまりデバイス・インディペンデント・カラーで行い、その色情報を用いて、出力系においてその色を合成するようなシステムを考えることが必要になる。

本稿では、デバイス・インディペンデント・カラーの基礎となる人間の視覚メカニズムに基づいた色の表記法をまず述べ、次にその色を再現するための原理、さらにマルチメディア時代の色再現を考えるうえで重要となるデバイス・インディペンデント・カラーを用いたカラーマネージメントシステムについて述べる。

1. 色の解析

色刺激が人間の眼に入ると、網膜にある錐体細胞によって受容される。錐体には分光感度が異なる3種類のも

千葉大学工学部画像工学科（〒263 千葉市稲毛区弥生町1-33）

E-mail: yaguchi@tcom.tech.chiba-u.ac.jp

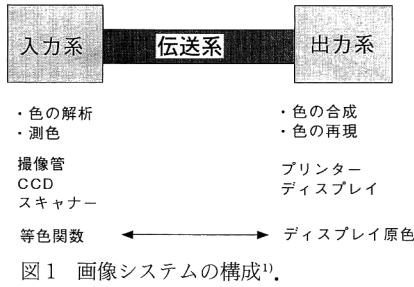


図1 画像システムの構成¹⁾。

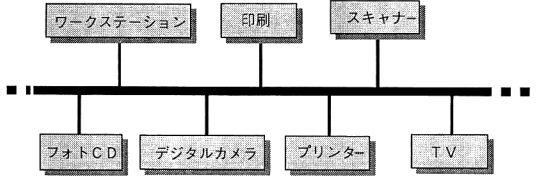


図2 異種画像デバイスのネットワーク。

のがあり、それらは短波長域、中波長域、長波長域に感度をもち、それぞれS錐体、M錐体、L錐体と呼ばれている。これらの3種類の錐体の応答の違いによりわれわれは色を識別することができる。したがって、この3種類の錐体の応答を用いて色を表記することが可能となる。このような方法は色の生理学的な表記法といえる。図3は3種類の錐体の応答を直交する軸にとって、単位エネルギーをもつ単色光による3種類の錐体からの応答を表現したものである。ここでは、これをLMS空間と呼ぶことにする。各波長の単色光の応答を線で結び、軌跡として表している。図4はこれを別の表現形式で、波長の関数としての各錐体の応答を表したもので、すなわち分光感度曲線である。この分光感度を用いると、分光エネルギー分布が $E(\lambda)$ の光刺激による各錐体の応答は次式で与えられる。

$$L = \int E(\lambda)L(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

$$M = \int E(\lambda)M(\lambda)d\lambda \quad (2)$$

$$S = \int E(\lambda)S(\lambda)d\lambda \quad (3)$$

ここで、 $L(\lambda)$ 、 $M(\lambda)$ 、 $S(\lambda)$ はそれぞれL錐体、M錐体、S錐体の分光感度である。この L 、 M 、 S を用いれば、物理的な量から生理学的に色を解析することができる。しかし、現在使用されている国際照明委員会(CIE)による表色系が制定された1931年当時はまだ錐体の分光感度を正確に求めることはできなかったため、この生理学的な色の解析法を国際的な規格として採用されることはなかった。

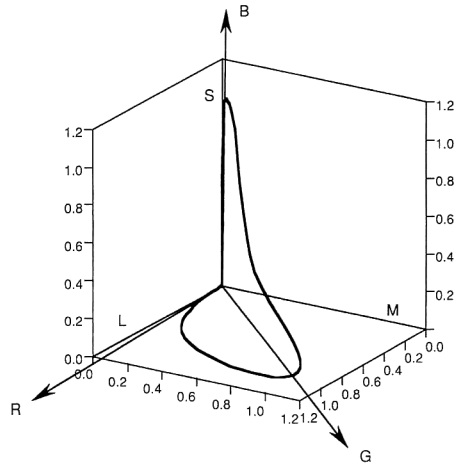


図3 LMS空間における等エネルギースペクトル軌跡。

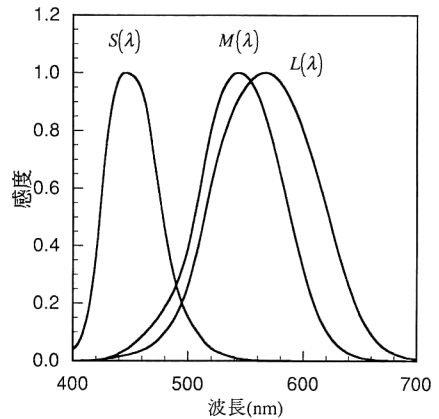


図4 錐体の分光感度曲線。

これに代わって採用されたのは等色実験に基づく方法である。これは、ヤング・ヘルムホルツの三色説に基づくもので、ある色を赤、緑、青の3つの色光(原刺激)を混色することによって等色し、そのときの各原刺激の量(三刺激値)を用いて色を表記するという方法である。CIEでは、赤、緑、青の原刺激にそれぞれ波長700 nm, 546.1 nm, 435.8 nmの単色光を用いている。これらの原刺激のLMS空間における方向を図3に示してある。図3の単位エネルギーをもつ単色光の軌跡をこれらR, G, B原刺激のベクトルの和としても表現できる。そのときの各原刺激のベクトルの長さは、等色に必要な三刺激値に相当する。図3をR, G, B原刺激を直交軸に取り、描き換えると、図5のようになる。これを波長の関数として表すと、図6のようになり、これは等色関数と呼ばれる。これを用いて、分光エネルギー分布

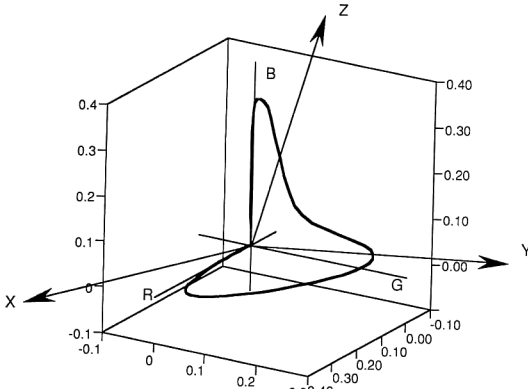


図5 RGB空間における等エネルギースペクトル軌跡。

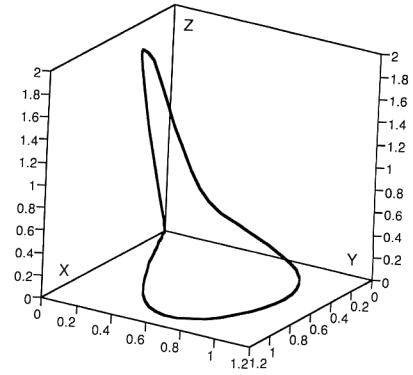


図7 XYZ空間における等エネルギースペクトル軌跡。

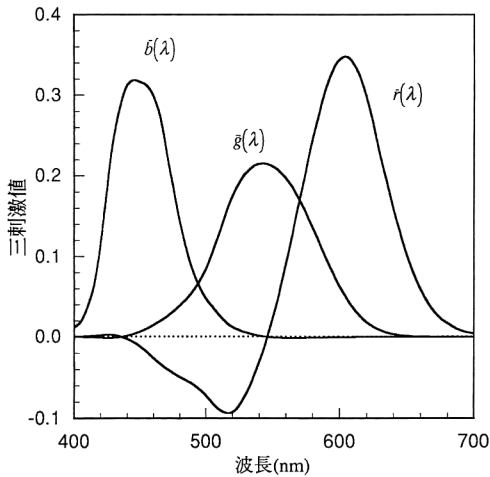


図6 RGB表色系の等色関数。

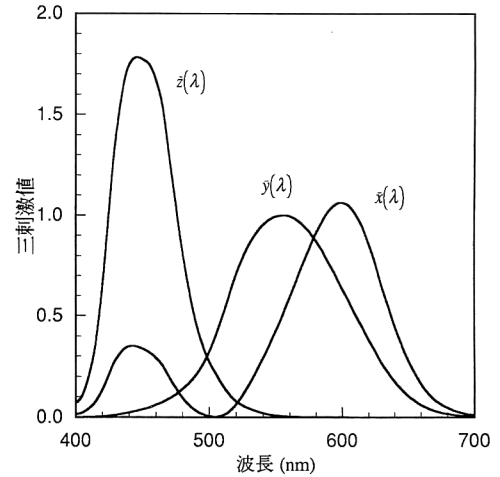


図8 XYZ表色系の等色関数。

が $E(\lambda)$ の光刺激の三刺激値は以下の式で得られる。

$$R = \int E(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

$$G = \int E(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

$$B = \int E(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

ここで、 $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 、 $\bar{b}(\lambda)$ は等色関数である。この色の表記法は CIE の RGB 表色系と呼ばれる。

しかし、RGB 表色系は図6からもわかるように、負の刺激をもつことや、三刺激値から測光量である輝度を求めるためには変換式が必要であることなどから、また別の原刺激をもつ表色系が定義された。これが、XYZ 表色系である。図5に RGB 空間における X, Y, Z 原刺激の方向を示す。ここで、X 軸と Z 軸を含む平面は輝度が0の面（無輝面）になるようにとっており、三刺激値 Y だけに輝度と一致するようにしてある。X,

Y, Z 原刺激を直交する軸にとれば、図7のように変換される。また、その等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ は図8のように表され、三刺激値は次式で定義される。

$$X = k \int E(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

$$Y = k \int E(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

$$Z = k \int E(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

ここで、 k は係数である。XYZ 表色系は現在最も広く用いられている表色系である。

これまで述べた LMS 表色系、RGB 表色系、XYZ 表色系は、ある色空間（例えば図3の LMS 空間）において原刺激の方向（色度座標）を変えただけであるので、ある表色系 A から別の表色系 A' への等色関数の変換は次式のような線形変換で表される。

$$\begin{bmatrix} \bar{r}'(\lambda) \\ \bar{g}'(\lambda) \\ \bar{b}'(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{bmatrix} \quad (10)$$

ここでの係数行列は表色系 A' における表色系 A の原刺激の色度座標から決定される。三刺激値の変換も同様である。したがって、RGB 表色系でも XYZ 表色系でも錐体応答という人間の視覚特性に基づいたものであり、デバイスに依存しない色の解析法であるといえる。

2. 色の合成

さて、次に色の合成、つまり色の再現方法を考えてみよう。前節で述べた色の解析結果、すなわち光刺激の分光放射と等色関数の積の積分値として与えられる三刺激値をもつ色を再現することを考える。これは測色的色再現と呼ばれている。まず、ここでは問題を単純化するために CRT ディスプレイで代表される加法混色法による画像出力機器を考えることにする。加法混色法における測色的色再現は画像出力機器の原色（ディスプレイ原色）を用いた等色実験として考えられる。したがって、用いるディスプレイ原色を原刺激とした場合の等色関数から得られる三刺激値を用いれば、測色的色再現が実現される。図9はある CRT ディスプレイの原色 ((x, y) 色度座標で、赤原色：(0.615, 0.357)、緑原色：(0.287, 0.602)、青原色：(0.146, 0.057)) から得られた等色関数である。画像入力機器の分光感度をこの等色関数と一致させれば測色的色再現となる。機器によりディスプレイ原色は異なるが、これは等色実験における原刺激の違いに相当し、ある原色系から別の原色系への変換と等価である。ディスプレイ原色の色空間での位置、

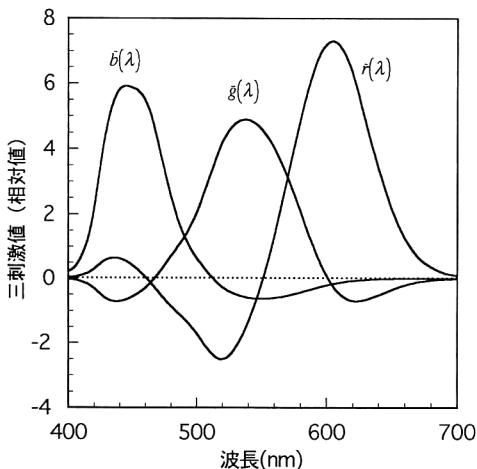


図9 実際の CRT ディスプレイ原色による等色関数。

つまり色度がわかっていればどのような等色関数を用いても、式(10)によってディスプレイに与えるべき三刺激値が得られる。式(10)の係数行列は出力デバイスに依存したものであるが、得られる結果はデバイス・インディペンデントな三刺激値となり、これを用いれば測色的色再現は実現できる。

写真、印刷、プリンターなどのハードコピーのような減法混色法による画像の場合は、出力デバイス独自の色信号と三刺激値の対応関係は簡単には求められない。多くの場合、出力デバイスへの入力信号と出力された画像の三刺激値の関係を得るために、多項近似式、3次式、4次式などの非線形変換を行ったり、ニューラルネットワーク、ルックアップテーブルを用いて対応関係を求めている²⁾。このような変換法は出力デバイスごとに作らなければならない。しかし、この場合でも、一度デバイス信号と三刺激値の変換法を作ってしまうと、あとはデバイス・インディペンデントな三刺激値を再現できることになる。このようなデバイス独自の色信号とデバイス・インディペンデントな三刺激値の関係を与えるものをデバイス・プロフィールと呼んでいる。

3. マルチメディアにおける色再現

さて、図2に示すようなネットワーク上での色情報の伝達にはデバイス・インディペンデント・カラーを用いる必要があると述べたが、それでは XYZ のような三刺激値を用いればよいのであろうか。答えはノーである。三刺激値が同一の色でも、それを観察する環境によって色の見えは異なる。人間の視覚系は、どのような環境においても物の認識ができるように、その環境に順応し、色の見え方が安定して見えるように働く。その結果、同じ物体は分光エネルギー分布が異なる照明の下に置けば、その分光放射輝度は変わり、三刺激値も変化するが、その色の見えの変化は同じ三刺激値の変化が同じ照明条件で起こった場合の色の見えの変化と比べるとはるかに少ないものとなる。これは色恒常と呼ばれるものである。図2のような状況では、画像メディアも異なるし、それを観察する環境も異なる。したがって、三刺激値のやり取りでは、色の見えの不一致が生じることになる。

そこで、三刺激値でなく、色の見えを表すような情報を用いることが必要となる。三刺激値は前述のように錐体応答の別の表現法、つまり視覚情報処理の初期段階の表現法であるのに対し、色の見えは視覚情報処理の最終的な出力である。したがって、色の見えを表すには、錐

体レベルからさらに高次のメカニズムを考慮に入れなければならない。これを試みたひとつの例が CIE が 1976 年に制定した $L^*a^*b^*$ (CIELAB) である。CIELAB は次式で定義されている。

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \quad (11)$$

$$a^* = 500 \left\{ \left(\frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right\} \quad (12)$$

$$b^* = 200 \left\{ \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right\} \quad (13)$$

これらの式は高次視覚メカニズムを 3 つの点で考慮している。まず、輝度情報と色情報の分離である。XYZ 表色系でも三刺激値 Y だけに輝度の情報を与えたが、ここではさらに進んで、 L^* で知覚量に対応する明るさの情報を表し、 a^* 、 b^* で視覚の反対色性を考慮した色の情報を与えている。視覚の反対色性については、心理学的にはヘリングの反対色理論として、赤と緑の色の見えは共存しないこと、同様に黄と青も共存しないことから示唆されており、生理学的にも錐体の信号を受け取る水平細胞、さらに高次の神経節細胞、外側膝状体における細胞でも反対色性が確認されている。 a^* は緑から赤の、 b^* は青から黄の色の見えの変化を表す。第 2 点は光強度の物理量と視覚量の非線形性を考慮していることである。三刺激値は物理量に比例する量である。しかし、人間の心理量は一般に物理量に対し非線形であることが知られている。CIELAB では $1/3$ 乗の指数関数でこの非線形性を導入し、より知覚量に近い量として定義されている。第 3 点は順応効果の考慮である。式 (11)~(13) における分母の X_n 、 Y_n 、 Z_n は環境の照明を用いたときの白色物体の三刺激値である。すなわち、与えられた環境での白色で正規化することにより、視覚系の順応を取り入れ、照明が変化しても白色物体の色の見えは変化しないということを表している。CIELAB はもともと色差式を定義するための均等色空間として作られたものであるが、これを拡張して、色の見えを表すひとつの方法としても用いられている。色の見えを表すものとしては、明るさ、鮮かさ、色相などの属性を用いるのが一般的である。CIELAB では前述の L^* を明度として定義し、さらにクロマ C^*_{ab} 、色相角 h_{ab} を次式で定義している。

$$C^*_{ab} = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (14)$$

$$h_{ab} = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (15)$$

このように CIELAB によって色の見えをある程度表現することができるが、完全な色の見えの予測にまでは

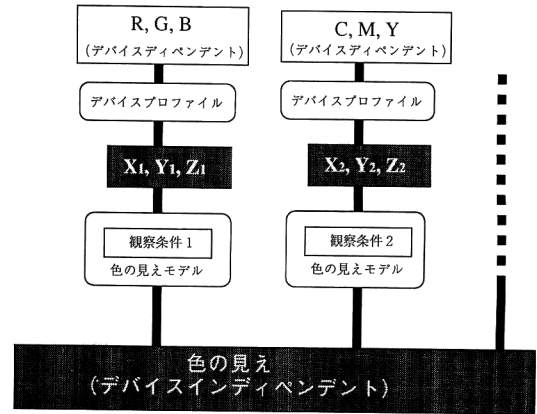


図 10 色の見えモデルを利用した色情報ネットワークシステム。

至っていない。そこで、種々の研究者が色の見えのモデルを次々と提案している。代表的なのは、Hunt³⁾、Nayatani⁴⁾、Fairchild⁵⁾、Luo⁶⁾ によるものである。これらのモデルはすべて、視覚系の非線形性、照明の色温度、照度レベル、周囲の環境レベルを考慮したもので、ある与えられた環境での対象物の三刺激値 (X, Y, Z) の色の見えを予測するものである。したがって、これらのモデルでは対象物の三刺激値の他に環境を表す種々の変数が必要になる。

色の見えは頭の中のできる主観的なものなので、画像デバイスが変わっても、また環境が変わっても変化しない普遍的なものである。したがって、色の見えを用いて異なる画像メディア間での色情報のやり取りを行う方法が有効になろう。図 10 は色の見えモデルを利用した色情報ネットワークシステムの概要を表したものである。ある与えられた環境において色の見えを再現するためには、色の見えのモデルの逆変換を行うことによって、その環境で表示すべき三刺激値 (X, Y, Z) を求めることができる。この際、その画像の観察条件を色の見えモデルのパラメータとして設定する必要がある。得られた三刺激値はデバイスに独立な色信号である。ここで、デバイス・プロファイルを用いて、それぞれのデバイス独自の色信号へ変換し、色を再現すればよいことになる。

環境、画像デバイスに独立な「色の見え」を用いて色情報を伝達し、それぞれの観察環境、画像デバイスに依存した種々の変数を色の見えモデルのパラメータとして与え、最終的にまたデバイスに独立な三刺激値を与えることによって、デバイス・インディペンデント・カラーを実現するためのネットワークシステムが構築され

る。しかし、現段階では、どのモデルが最良の色の見えのモデルであるかの結論は出ていない。これについては国際照明委員会の技術委員会 CIE TC 1-34 で検討しているが、多くのユーザーが満足する色の見えのモデルの実現を待ちたい。

文 献

- 1) 矢口博久：“マルチメディアにおける色再現の考え方”，月刊ディスプレイ，No. 2 (1997) 27-31.
- 2) 小寺宏暉，金森克洋：“印刷・ハードコピーにおける色再現”，

テレビジョン学会誌，47 (1993) 753-764.

- 3) R. W. G. Hunt: "Revised colour-appearance model for related and unrelated colours," Color Res. Appl., **16** (1991) 146-165.
- 4) Y. Nayatani: "Revision of the chroma and hue scales of a nonlinear color-appearance model," Color Res. Appl., **20** (1995) 143-155.
- 5) M. Fairchild: "Refinement of the RLAB color space," Color Res. Appl., **21** (1996) 338-346.
- 6) M. R. Luo, M. Lo and W. Kuo: "The LLAB (*l*: *c*) Colour Model," Color Res. Appl., **21** (1996) 412-429.

(1997年2月27日受理)