

光の三原色：RGB を基準にした実用的なカラー変換式

Practical Color Transform Formulas Based on Primary Colors : RGB

◀キーワード：光の三原色，光と色，色（カラー）空間，
カラー変換式，デジタル画像処理



専門会員 飯塚 昌之
Masayuki Iizuka



専門会員 中嶋 芳雄
Yoshio Nakashima

1. まえがき

私たち人間が「視覚」，すなわち目から取り入れる外界からの情報には，物体の空間的な大きさ，形状，配置および時間的な変化，動き，色（カラー）などがある。これらの情報が効率よく適切に識別・判断されるためには，物体から「ひとみ」に入射し，網膜上に結像する光の量と質に関する刺激・信号の扱い方や理解が重要となる。視覚のうち光の量，すなわち明暗に対応する感覚は「比視感度」と呼ばれる人間の目の波長感度にもとづいて「測光量」の一つである光束と対応づけられる。数 cd/m^2 以上の「輝度」に順応した「明所視」の場合には，明暗ばかりでなく色感覚も生じる。網膜上の「すい状体」には3種類あって，それぞれ光の三原色：RGB 的な信号を発生し，それが網膜内の神経細胞（ニューロン）で反対色的なパルス信号に変換，脳に伝達されて中枢神経が興奮する。その結果を意識すると色感や色彩感覚を生じ，さらに心にまで情報が伝えられると種々の感情表現が付加されて色知覚となる¹⁾。

物体色を表現し情報の交換・伝達する場合，ある色感覚に名称が付けられると多くの人たちの共通の認識になる。慣用的な色名やマンセル表色系による記号： HV/C が広く利用されている。一方，光源色の場合には，1931年に国際照明委員会（CIE）が勧告・推奨したXYZ色空間による $x-y$ 色度図上で数値あるいは色温度などにより色が定量的に表現できる。

カラーテレビジョン：NTSC（National Television System Committee）方式においては，色の三属性：色相，明度，彩度，すなわちマンセル表色系： HV/C の代わりに，撮像系で色分解による光の三原色：RGB 信号を取り出し，伝送系で輝度信号： Y 成分と2種類の色度信号： I と Q 成分に分離して，色の情報を効率的に処理している。

現在，光の三原色から相異なる属性（特性）の組み合わせとして，色を定量的に表示するために，多くの色空間（表色系）が提案され実用化されている。色空間はマンセル表示やNCS（自然色システム，Natural Color System）のような心理知覚量で定義されるシステムとXYZやCIE色空間のような心理物理量で定義されるシステムに分類できる。前者と後者の間を結び付ける色（カラー）変換式は，用途・目的によりかなり限定されて

いる。後者の心理物理量にもとづく色空間では，RGB を基準にした3属性による色変換式が映像，ビデオ，カラー画像圧縮へ応用として広く使用されている。

一般的に，“色（カラー）”と“色彩”の用語は，日常生活においても類似な言葉や概念を意味し広く使用されている。色（カラー）は、『JISハンドブック：色彩』に準拠すると，色名または色の三属性で区分，または表示できる視知覚の特性を意味する。しかしながら，“色彩”の用語は，照明工学と同様に光と色（カラー）を含めた境界領域的な学問・技術分野，すなわち色彩論や色彩工学としても広く使用されている。『ライティングハンドブック<色彩技術の基礎>』によると，色彩という用語は，色と同義としているが，色彩は物体の色知覚に対応して用いることが多いとの記述がある。色感覚（Color Sensation，目がカラー刺激を受けて生じる効果）は光が目に入って生じるRGBなどの視覚的な感覚に相当する。一方，色知覚（Color Perception，色感覚にもとづいて対象のカラーの状態を知ること）は色感覚に加えて，対象を見るとき視環境を考慮し，例えば赤い花の質感，形，大きさなども個人的に認識され，また過去の経験や記憶を総合して色を知覚するような主観的でより高次の感覚である²⁾。川上は色彩学とは，主観的・客観的な色彩現象に関する理論体系であると説明している³⁾。

本解説では，便宜的に色と色彩の用語を区別することなく，慣用的に片仮名“カラー”を使用する。光の三原色を基本的なカラー情報と考えて，デジタルカラー画像処理のために実用的で広く知られているカラー変換式の種類，RGBカラー空間からの他のカラー空間を使用する理由や問題点について解説する。さらに，資料・文献で引用されている事例，例えば，カラー静止画像の圧縮・再生向きのカラー空間表示と種々のカラー変換式との関連性や特徴についても言及する⁴⁾。

2. 定量的なカラー表現とデジタル画像処理

色（カラー）は，光の三原色： R （レッド，赤）・ G （グリーン，緑）・ B （ブルー，青）の各成分の組み合わせ，あるいはRGBの各補色に相当する C （シアン，青緑）・ M （マゼンタ，赤紫）・ Y （イエロー，黄）を組み合わせで使用する。例えば，色の用語は顔料や染料，カラーコピーやカラープリンター機器のトナー剤の色を指定する時，あるいは HV/C マンセル表色系の色相： H に相

当する属性だけを単独に表現する際に、狭義の用語として使用する場合があります。一方、色彩の用語は、マンセル表色系による物体色表示や XYZ 色空間（表色系）から $x-y$ 色度表示、あるいは2種類以上の相異なる属性：無彩色と有彩色の組み合わせ、例えば光の三原色からカラーテレビジョン NTSC 方式： YIQ 信号と呼ばれる色空間への変換、色彩心理学、環境色彩、色彩調和や配色、測色などの人間工学的な諸問題に対応させて、広義の概念を含む用語として使用する場合が多い。

情報化社会・マルチメディア時代、特にインターネットの普及で、コンピュータ上で日常生活に役立つ情報の検索、ホームページ作成、カラーハードコピー技術などが容易になった。音声と共に視覚的な情報：文字や画像・映像、特にカラー表現による情報交換・授受の役割がますます重要視されている。コンピュータを使用したカラー静止画像のデジタル化、例えば JPEG (Joint Photographic Coding Experts Group) 技法によるカラー静止画像の圧縮・再生では、 RGB 成分にもとづくカラー情報を相異なる3種類の属性に変換して使用している。CCD カメラ（デジタルカメラ）においても、 RGB 成分を輝度と2つの色度に分離してカラー情報処理を効果的に行っている。数値範囲（ダイナミックレンジ）の修正・変更を含めて輝度信号： Y 成分と2種類の色度信号： U と V 、あるいは Cb と Cr のカラー変換式が提案・実用化されている⁵⁾。

コンピュータによる情報の交換・伝送を含めて人間の生活に役立つ包括的な応用分野、例えば E-mail やインターネット関連分野が急速に普及してきた。カラーモニター、カラープリンター、デジタルカメラ、ビデオ機器などの取り扱いと処理操作、定量的な評価技法のためにも色再現を含めたカラー画像処理技術と管理の必要性がマスメディアで取り上げられるようになった。コンピュータグラフィックス (CG, Computer Graphics) のような情報処理の分野でもデジタルカラー画像処理の

研究は盛んであるが、各種の応用技術分野間でカラー表現を定量的に取り扱う規格や規準は必ずしも統一されていない。

色空間 (Color spaces) は、カラー座標システム (Color coordinate systems) あるいはカラーモデル (Color models) とも呼ばれ、カラー刺激 (情報) の3次元的な特性 (属性) 表現である。種々のカラー情報は色空間中の点 (位置、場所) によって指定される。一般的に、カラー情報や画像処理に使用される色空間は視覚システムモデル (例えば、 RGB モデル、反対色カラー空間モデル、 IHS モデルなど) から導出される⁶⁾。また、色空間は、技術的な領域 (例えば、測色分野での XYZ 、テレビ：NTSC 方式での YIQ 、画像圧縮：JPEG 方式での YUV など) や特別なカラー画像処理 (例えば、CG におけるコダック YC_1C_2) においても広く採用されている。

図1は種々のカラー空間 (表色系)、すなわち光の三原色： RGB あるいは三刺激値と呼ばれる XYZ を基準として、他の実用的なカラー空間への変換を用途・目的により便宜的に分類している。例えば、画像圧縮・符号化には輝度・色度分離表色系、定量的な色差の計算には3次元直交座標に準拠する CIE カラー空間 (表色系) などが広く利用されている。なお、コンピュータによるカラー印刷出力：カラープリンター機器やカラーコピー機器の場合には、 $CMYK$ から構成されるトナー剤 (インク) を適切に組み合わせ・制御してカラー再現している。

図2は一般的な写真技法に対して、CCD (電荷結合素子, Charge Coupled Device) カメラによるデジタルカラー画像処理の過程を示す。写真技法におけるフィルム面に CCD をセットして、A-D 変換、 RGB 分離、輝度 Y と色度 Cb ; Cr にもとづくカラー空間に変換後、JPEG による画像圧縮を行う。CCD 素子はカラーの区別ができないので、カラーフィルターを組み合わせる使用する。A-D 変換後は、デジタル信号にもとづいて RGB

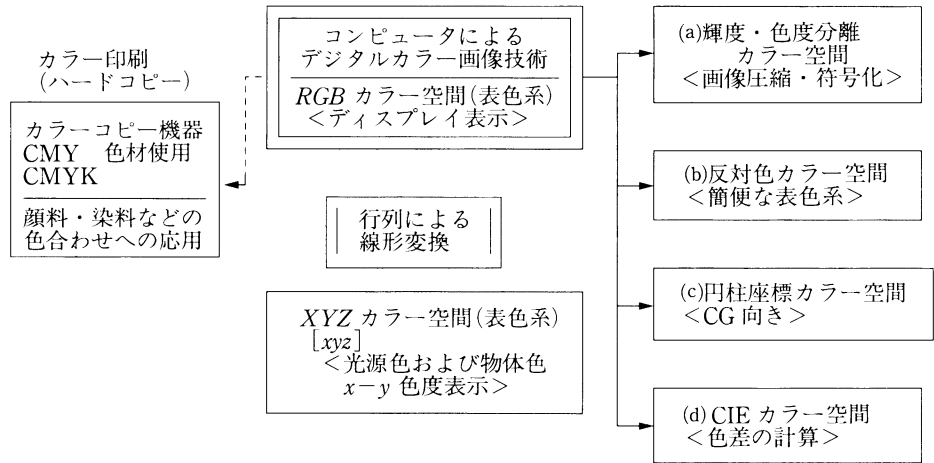


図1 RGB カラー空間から他のカラー空間への変換と主要な用途・特徴

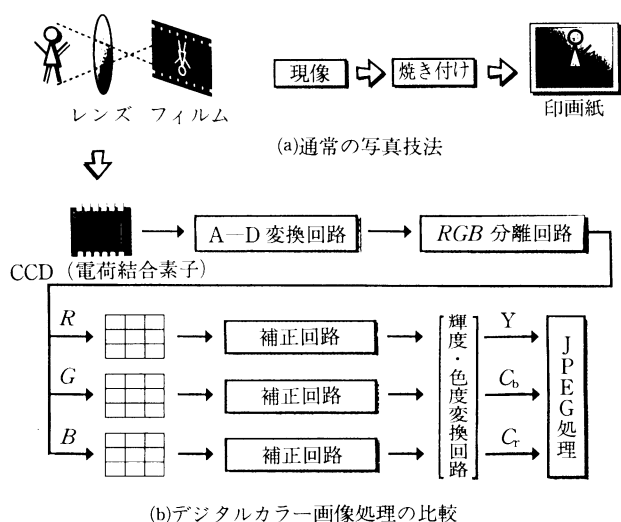


図2 写真技法とデジタルカラー画像処理の比較

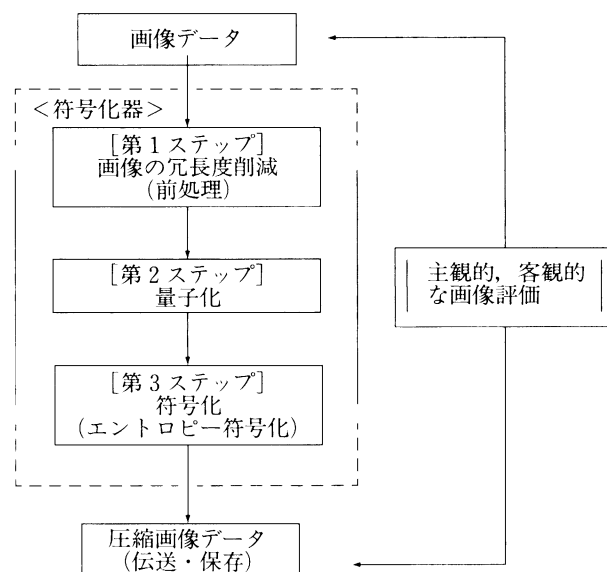


図3 画像データの非可逆的な圧縮符号化手順

分離回路で光の三原色に分解，補正回路でカラーごとに濃度（輝度）が調整・制御，輝度・色度変換回路により輝度・色度の信号に変換される。

デジタルカラー画像圧縮は可逆圧縮（lossless）と非可逆圧縮（lossy）に分類できる。前者は原画像を歪みや雑音による劣化なく完全に再現できる。後者では視覚的に知覚・識別できない情報を積極的に削除し，高い圧縮率を実現する技法である。一般的に，カラー画像の場合には，RGB 情報による原データをカラー変換式により前処理して，輝度と色度の相関性の少ない2種類の信号（データ）に分離後，効率的に非可逆圧縮を行うことが多い⁷⁾。カラー画像圧縮変換符号化技法のための実用的なカラー空間（表色系）として，次節で述べる YUV，YIQ，YCbCr カラー空間などが提案されているが，どのカラー空間を採用するかは応用技法に依存する。

図3はデジタル画像データの圧縮符号化の基本構成手順である。非可逆的な圧縮の場合，符号化器中の第1ステップと第3ステップで画像データのもつ冗長性の削減，第2ステップの量子化で人間の視覚特性を積極的に利用する。通常の画像データは，時間的，空間的，画像データ構成的な面からいろいろな冗長性を有する。画像データ圧縮符号化技法は，非可逆的な圧縮変換符号化とも呼ばれ人間の視覚特性と画像のもつ冗長性を積極的に利用する。その結果，原画像データの情報量（ビット数）が削減・圧縮され，伝送・再生される。さらに，記録媒体上には原画像データの代わりに，圧縮された画像データが効率的に記憶されて保存可能となる。

3. 実用的なカラー空間とカラー変換式

3.1 RGB カラー空間⁸⁾⁻¹⁰⁾

通常，RGB カラー空間（表色系）がコンピュータによるデジタルカラー画像表示のために広く使用されてい

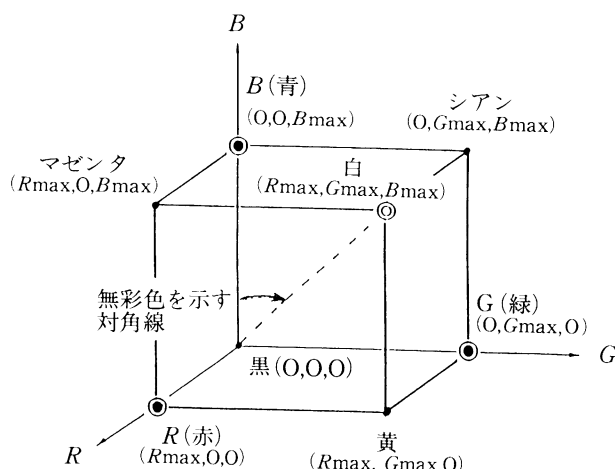


図4 RGB カラー空間（直交座標系）による8種類のカラー表示

る。カラー（ビデオ）カメラ，スキャナー，ディスプレイモニター機器などは，入出力用に直接的に RGB 情報（信号）を利用する。必要があれば，他のカラー空間の情報に変換できる。

図4は RGB カラー空間を示し，ある任意の輝度 Y は，各 RGB 成分の組み合わせにより次式で表現できる。ある任意の無彩色，灰色は原点（ $R=G=B=0$ ）と対角線の頂点（ $R=G=B=\max$ ）上に位置する。なお，無彩色（白，灰色，黒）の Y 成分は， $R:G:B=1:1:1$ の時，加法混色の結果として得られる。一般的に，RGB 成分の数値は，0 から 255 まで，あるいは 0 から 1 までのように規格化して使用することができる。

$$Y = C_R \cdot R + C_G \cdot G + C_B \cdot B \quad (1-a)$$

ここで， C_R ， C_G ， C_B ：RGB 成分の割合（係数）

輝度（明るさ）の度合いを考慮して，相対的な rgb 色度座標が定義できる。

$$r = R/S; g = G/S; b = B/S = 1 - r - g \quad (1-b)$$

表1 加法混色と相対的な輝度

カラー	三原色の組み合わせ	相対的な輝度 (明るさ) [%]
白	<i>RGB</i>	100
Yellow	<i>RG</i>	90
Cyan	<i>GB</i>	70
緑： <i>G</i>	<i>G</i>	60
Magenta	<i>R B</i>	40
赤： <i>R</i>	<i>R</i>	30
青： <i>B</i>	<i>B</i>	10
黒	-----	0

NTSC 方式：
 $Y=0.299R+0.587G+0.114B$

ここで、 $S=R+G+B$

応用面において、上記 *RGB* 成分の割合の一つを零にすると、簡便に擬似カラー表示ができるため、カラー総数の制限された数値範囲で温度、照度、等高線図の高さなどの物理量との対応づけができる。

表1は、*R*、*G*、*B* がおのおの1ビットの場合に光の三原色を使用して、カラーCRT あるいは LCD ディスプレイ装置上で加法混色を行う場合の相対的な輝度（明るさ）を示す。(1)式において、*RGB* 各成分が1ビットの2値しか表示できないカラーCRT（白と黒を含めて計8色）の場合でも、ディザ法を応用することにより中間調の擬似カラー表示が可能である¹¹⁾。一方、この *RGB* カラー空間の欠点は、通常のカラー自然画像における各カラー成分間の相関係数、〈例えば、*B* と *R* で0.78、*R* と *G* で0.98、*G* と *B* で0.94〉と相関性が高いため、直接的にカラー画像の各 *RGB* 成分を組み合わせて画像圧縮することに対しては不向きである。また、各 *RGB* 成分間の割合（係数）を組み合わせ、心理物理的にある指定のカラーを構成することや *RGB* カラー空間における距離（長さ）に基づいて視覚的にカラー感覚の相違を評価することは困難である。

3.2 XYZ カラー空間¹²⁾

1931年、CIE（国際照明委員会）によって採択された波長 λ にもとづく等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ を使用した *XYZ* 表色系が広く知られている。光源色の三刺激値 *X*、*Y*、*Z* は、次式によって定義される。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = k \int P(\lambda) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \tag{2-a}$$

ここで、 $P(\lambda)$ ：光源の放射量の相対分光分布
 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ ：等色関数でスペクトルの三刺激値とも呼ぶ。
 k ：比例定数、三刺激値の *Y* の値が測光量に一致するように定める。

\int ：積分記号で、380nm から780nm の範囲の定積分

色度 *x*、*y* は（2-a）式による三刺激値 *X*、*Y*、*Z* の結果を使用して、次式により求められる。

$$x=X/(X+Y+Z)$$
$$y=Y/(X+Y+Z)$$

一方、*RGB* カラー空間によって変換できる色域は、カラーCRT の3種類の蛍光体の特性に依存して、三刺激値と呼ばれる *XYZ* 成分は下記のマトリックス（行列）形式により表示でき、（2-a）式の定義とは異なっている。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \tag{2-b}$$

ここで、*X_i*、*Y_i*、*Z_i*：重み係数（添字 *i* は *R*、*G*、*B* に相当）
R、*G*、*B*：光の三原色

光の三原色：*RGB* の各成分から三刺激値：*XYZ* 成分を有する非負の数値に変換される *XYZ* カラー空間が勧告・提案された。デバイス機器の特性に依存しないカラー空間で、心理物理的なカラー変換式と逆変換式はおのおの下記のように表記できる。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.769 & 1.752 & 1.130 \\ 1.000 & 4.591 & 0.060 \\ 0.000 & 0.057 & 5.594 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \tag{2-c}$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.418 & -0.159 & -0.083 \\ -0.091 & 0.252 & 0.016 \\ 0.001 & -0.003 & 0.179 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

その後、1982年、Wyszecki and Stiles らは、現在広く利用されているカラー変換式を提案した¹³⁾。*Y* 成分は（2-a）式中の測光量 *Y* と異なり、*RGB* 成分のおおのの組み合わせによる有彩色、すなわち原カラー画像の平均的な輝度（明るさ）に相当する。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.490 & 0.310 & 0.200 \\ 0.177 & 0.812 & 0.011 \\ 0.000 & 0.010 & 0.990 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \tag{2-d}$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.365 & -0.897 & -0.468 \\ -0.515 & 1.426 & 0.089 \\ 0.005 & -0.014 & 1.009 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

XYZ カラー空間は、（1-b）式と同様な相対的な *xyz* カラー空間表示、すなわち *x-y* 色度座標に変換できる。

$$x=X/S; \quad y=Y/S; \quad z=Z/S=1-x-y$$

ここで、 $S=X+Y+Z$

画像処理（カラービデオカメラ、CCD カメラ）の場合

合、アメリカやヨーロッパでは (2-d) 式を修正した次のような変換式が利用されている¹⁴⁾⁻¹⁵⁾。

◎ FCC (Federal Communication Commission)
による RGB から XYZ への変換

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.607 & 0.174 & 0.200 \\ 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.000 & 0.066 & 1.116 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2-e)$$

◎ EBU (European Broadcasting Union) による
RGB から XYZ への変換

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.430 & 0.342 & 0.178 \\ 0.222 & 0.707 & 0.071 \\ 0.020 & 0.130 & 0.939 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2-f)$$

3.3 輝度 Y と 2 種類の色度によるカラー空間

(1) YIQ カラー空間¹⁴⁾

テレビジョン向きのカラー空間の特徴は、輝度と色度情報の分離により、2つの色度に必要な帯域、例えば Y 成分の 4 MHz に対して、I 成分は 1.5MHz と Q 成分は 0.5MHz におおの削減できるので、効率的なアナログ信号処理と伝送が実行できる。アメリカやわが国のカラーテレビ方式 (NTSC) は、FCC 変換式に関連して、輝度 Y は (2-e) 式中の Y 成分と同じである。I 成分 (オレンジーシアン軸) と Q 成分 (マゼンターグリーン軸) はおのおの R, G, B 成分に関連し、負の数値になる場合もある。

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.274 & -0.322 \\ 0.211 & -0.523 & 0.312 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3-a)$$

$$\begin{cases} I = 0.74 \times (R - Y) - 0.27 \times (B - Y) \\ Q = 0.48 \times (R - Y) + 0.41 \times (B - Y) \end{cases} \quad (3-b)$$

YIQ カラー空間は、円柱座標系を使用して、2つの属性: H_{IQ} と S_{IQ} を有する YHS カラー空間に変換できる。なお、YHS カラー空間は、コンピュータグラフィックス分野で、Y 成分を I 成分に置き換えて IHS カラー空間と呼ばれる場合がある。H と S の成分はそれぞれ色相と彩度に関連がある (図5を参照)。

$$\begin{cases} H_{IQ} = \tan^{-1}(Q/I) \\ S_{IQ} = \{I^2 + Q^2\}^{1/2} \end{cases} \quad (3-c)$$

(2) YUV カラー空間¹⁵⁾

デジタルカラー画像圧縮のために応用されるカラー空間で、ヨーロッパ PAL (Phase Alternating Line) テレビ方式は、EBU 変換式に関連している。なお、Y 成分は、(2-e) あるいは (3-a) 式中の Y 成分と同じである。

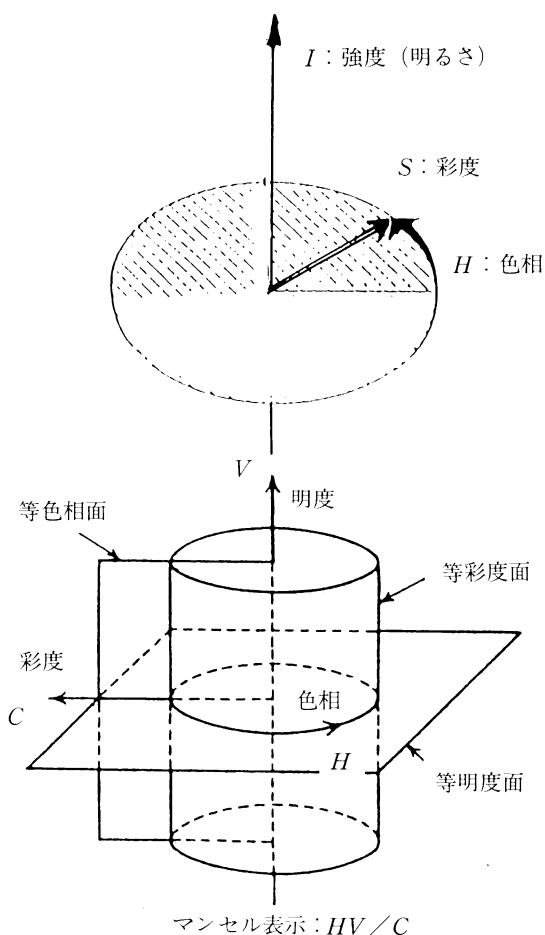


図5 IHS カラー空間 (円柱座標系) による三属性表示

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.148 & -0.289 & 0.437 \\ 0.615 & -0.515 & -0.100 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3-d)$$

$$\begin{cases} U = 0.493 \times (B - Y) \\ V = 0.877 \times (R - Y) \end{cases} \quad (3-e)$$

UV 色度平面では、カラー自然画像の場合に色度に相当する U および V 成分のおおの10%に対して、輝度に相当する Y 成分は80%の情報データを含んでおり、デジタルカラー画像の変換符号化やカラービデオなどで広く使用されている。カラー静止画像の圧縮・再生、すなわち JPEG 方式では、例えば $Y:U:V = 4:1:1$; $Y:U:V = 4:2:2$ のように、UV 成分の各々の解像度に対して、Y 成分の解像度 (画素の大きさ) は 4 倍あるいは 2 倍になるよう勧告されている。円柱座標系を使用することにより、YUV カラー空間は (3-c) 式と同様に、IHS カラー空間の 2 つの属性: H_{UV} と S_{UV} に変換できる。

$$\begin{cases} H_{UV} = \tan^{-1}(V/U) \\ S_{UV} = \{U^2 + V^2\}^{1/2} \end{cases} \quad (3-f)$$

(3) YC_bC_r カラー空間¹⁶⁾

YC_bC_r カラー空間は、 YUV カラー空間における UV 成分を変更・修正して YC_bC_r カラー空間の変換式としたもので、現在ビデオ信号の符号化やカラー動画の圧縮符号化などにおける基準方式：MPEG (Moveng Picture Experts Group) として広く普及している。カラー動画の圧縮・再生のために MPEG や モーション JPEG, H.261規格などがある。

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_b \\ C_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.169 & -0.331 & 0.500 \\ 0.500 & -0.418 & -0.081 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3-g)$$

$$\begin{cases} C_b = 0.564(B - Y) \\ C_r = 0.713(R - Y) \end{cases} \quad (3-h)$$

3.4 反対色カラー空間 (Opponent Color Space)¹⁷⁾

反対色カラー空間は、人間の視覚システムの生理学的な機能により提起された概念である。Hering は人間の視覚システムにおいて3つのチャンネル： G と R , Y と B , 白と黒の存在を仮定して輝度と色度を分離した。現在、 RGB すい体からの信号は1つの無彩色チャンネルと2つの反対色チャンネルに分離するものとして、変換式が提案されている。最近、人間の視覚システムにおけるすい体の応答は刺激強度の対数に比例することを考慮して対数による変換式が提示されている¹⁸⁾。

3.5 $I_1I_2I_3$ カラー空間¹⁹⁾

$I_1I_2I_3$ カラー空間は太田らにより提案された簡便な変換であり、 I_1 成分はカラーの平均的な輝度(強度)情報を、 I_2I_3 成分は色度情報を指定する。これらの各成分は各々の RGB 成分を無相関にするような Karhunen-Loeve 変換に比較して良好な近似結果をもたらすことが指摘されている。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/2 & 0/2 & -1/2 \\ -1/4 & 1/2 & -1/4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.6 IHS カラー空間²⁰⁾

IHS カラー空間はマンセルの色立体に類似しているが、彩度の扱いに関してやや相違する。コンピュータグラフィックス (CG) 分野でかなり利用されているが、各 IHS 成分の計算式や処理手順、条件・仮定などが異なっているので注意する必要がある。

図5は IHS カラー空間 (円柱座標) におけるカラー表示で、輝度や明るさに等価な強度： I 成分は RGB から簡便に計算する。一方、彩度： S 成分は三原色の3成分から、あるいは I 成分の条件に従って算出し、色相： H 成分は3角関数の使用の有無や RGB 成分の指定条件を考慮して算出する式などが提案されている。なお、 IHS

カラー空間で指定されている I 成分は (3-a) および (3-b) 式中の I 成分とは相異なる変換式である。

$$\begin{aligned} I &= R + G + B \quad \text{あるいは} \quad (R + G + B) / 3 \\ S &= 1 - 3 \min(R, G, B) / I \end{aligned} \quad (5-a)$$

$$\begin{aligned} &\text{あるいは} \\ I &\leq I_{\max} / 3 : \\ S &= I_{\max} - 3 \frac{\{\min(I_{\max} - R, I_{\max} - G, I_{\max} - B)\}}{3 - (R + G + B)} \end{aligned} \quad (5-b)$$

$$\begin{aligned} &I > I_{\max} / 3 : \\ S &= I_{\max} - 3 \min(R, G, B) / I \\ &\text{色相: } H \text{ 成分は下記の3種類の条件を考慮して算出} \\ &\text{する。} \end{aligned}$$

$$\begin{array}{|l|l|l|} \hline (a) & (b) & (c) \\ \hline \min(R, G, B) = B & \min(R, G, B) = R & \min(R, G, B) = G \\ \hline \end{array} \quad (5-c)$$

$$H = (G - B) / 3(R + G - 2B) \quad | \quad H = (B - R) / 3(G + B - 2R) + 1/3 \quad | \quad H = (R - G) / 3(R + B - 2G) + 2/3$$

ここで、 $I_{\max} = R_{\max} + G_{\max} + B_{\max}$: 3変数 RGB 成分中の各最大値の代数和

$\min(R, G, B)$: 3変数 RGB 成分中から最小値を指定する関数

CG分野では、 IHS カラー空間と類似な HSV や HLS カラー空間 (モデル) も提案されているが、本解説では紙面の都合で省略する (例えば、参考文献⁹⁾を参照)。

3.7 均等カラー空間²¹⁾

物体の色 (カラー) は明度を含んだ3次元の属性をもつので、カラー空間で3次元のどの方向へもカラーの変化が感覚的に均等な空間が構成されれば、色差感覚の均等性が保持され実用上便利である。

均等カラー空間は CIE (国際照明委員会) が1976年に勧告して定めた3次元直交座標系による空間であり、三刺激値： XYZ を使用して、2種類のカラー空間：CIELAB と CIELUV の属性が算出できる。人間の視覚特性に寄与する非線形関数が採用されている。なお、2組の数値データを使用して、3次元直交座標系の距離の差に対応する“色差”が定量的に定義されている。

3.8 近似 HVC カラー空間 (MTM 表色系)²²⁾

近似 HVC カラー空間は、CIE (1976) $L^*a^*b^*$ カラー空間と同様な均等カラー空間の一つで、マンセルの表色系： HV/C の数値を使用することにより色差式が定義できる。したがって、デジタルカラー画像処理による符号化誤差に起因する原画像と再生画像間の主観的な色差を定量的に扱うことができる。宮原らは人間の視覚にもとづく非線形特性を考慮して、 RGB カラー空間から実用的な近似 HVC カラー空間 (Mathematical Transform to Munsell, MTM 表色系) への数学的なカラー変換式と変換手順を提案した。

3.9 コダック YC₁C₂カラー空間²³⁾

ウェーバー・フェヒナーの法則あるいはスチーブンスの法則によると、ある刺激（入力） I に対して、人間の視覚的あるいは知覚的な明るさ感覚（出力） E は、おのおの下記の式で表現できる。

ウェーバー・フェヒナーの法則： $E = k \times \log I$
スチーブンスの法則： $E = k \times I^\beta$ (6-a)

$I = K \times E^{(1/\beta)} = K \times E^\gamma$
 $\therefore \log I = K' + \gamma \times \log E$ (6-b)

ここで、 k ； K ； K' ； $\gamma = 1/\beta = 2.2 \sim 3.0$ ：定数
一般的に、モノクロ写真感光材料の特性、すなわち H-D 曲線〈露光量と濃度（あるいは透過率の逆数）の関係〉の場合には、 γ 値は両対数による直線部分の傾きに相当する。

コダック社は光 CD 上にカラーデジタル画像の書き込みと保存のために、YC₁C₂カラー空間と呼ばれる変換式を提案した。人間の視覚的な明るさ感覚 E は、CIE (1976) $L^*a^*b^*$ カラー空間における L^* の数値で近似できる。通常、カラーディスプレイ（CRT）機器では、心理物理量に相当する RGB 画素の輝度レベル（入力：ビーム電圧あるいは電流により量子化された数値）は、知覚心理量に対応する人間の明るさ感覚（出力）に比例しない。人間の目による明るさ感覚、すなわち非線形特性を有するガンマ補正された光の三原色： $R'G'B'$ の数値を使用し、下記の手順により YC₁C₂を計算する。なお、各 $R'G'B'$ 成分の数値は、予め f' と f の定義式中の f に、規格化された RGB の数値を代入して算出する。

Step 1：カラースキャナーに対するガンマ補正

$$f' = \begin{cases} 1.099f^{0.45} - 0.099 \approx f^{1/2} & f \geq 0.018 \\ 4.5f & |f| < 0.018 \\ -1.099|f|^{0.45} + 0.099 & f \leq -0.018 \end{cases}$$

(7-a)

ここで、
 f ： R, G, B 成分の強度（0～255レベル）に対応
 f' ： R, G, B 成分のガンマ補正後の強度に対応

Step 2：線形変換

$$\begin{bmatrix} Y' \\ C1' \\ C2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.299 & -0.587 & 0.886 \\ 0.701 & -0.587 & -0.114 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix}$$

(7-b)

Step 3：YC₁C₂（8ビットデータへの変換）

$$Y = (255/1.402) Y'$$
$$C_1 = 111.40 \times C1' + 156$$
$$C_2 = 135.64 \times C2' + 137$$

(7-c)

表2はデジタルカラー画像処理の諸分野で提案、広く普及しているカラー空間、すなわち光の三原色：RGB にもとづくカラー空間（表色系）から他の実用的なカラー空間への変換：(a)線形性、(b)計算の容易さ〈逆変換

表2 RGB カラー空間と他のカラー空間における変換特性の特徴比較

カラー空間の種類	変換の線形性	計算の容易さ 再現性	カラー感覚の 均等性
RGB（基準）	— なし	— なし	— なし
XYZ	あり なし	あり なし	なし なし
YUV	あり	あり	なし
YIQ	あり	あり	なし
YC _b C _r	あり	あり	なし
反対色	あり	あり	なし
I ₁ I ₂ I ₃	あり	あり	なし
IHS	なし	なし	なし
YC ₁ C ₂	なし	あり	なし
〈均等色空間〉			
CIELAB	なし	あり	あり
CIELUV	なし	あり	あり
マンセル	なし	あり	あり

の簡便さ〉、(c)感覚的なカラー空間〈均等な一様性〉を比較したものである⁴⁾。

表3は図1と関連させて、実用的なカラー変換式間の特徴を相互に比較したものである。一般的なカラー画像表示やコンピュータグラフィックスでは、RGB 表色系や円柱座標表色系、カラー画像の圧縮・再生には輝度と色度の分離表色系、色差の定量的な評価には CIE 表色系の変換式が有効である。特に、CIE〈 $L^*a^*b^*$ 〉、CIE〈 $L^*u^*v^*$ 〉、近似 HVC カラー空間などは、均等カラー空間とも呼ばれ、定量的な数値とカラー感覚（見え方）との間には、座標上の幾何学的な距離による対応づけが可能である。

最近の CIE News によると、Division 8 が設置された^{24)–25)}。主たる活動目標・目的は、グラフィックアート、インターネットと通信技術、医学のような広範囲の分野で応用できるカラー画像技術における共通な基準や勧告を行うことである。例えば、カラー空間と変換技法に関連する委員会としては、TC 8-02〈画像の色差評価〉や TC 8-03〈色域マッピング〉などがある。

4. まとめ

本解説では、コンピュータによるカラー画像表示とその応用、特にデジタルカラー画像表示と画像圧縮・再生の立場から、実用的なカラー空間（表色系）とカラー変換式について説明し、それらの特徴をカラー変換の線形性、計算の簡便さ、カラー感覚の均等性の観点から比較した。一般的に、カラー変換式は光の三原色：RGB の数値の代わりに、人間の目による明るさ感覚、すなわち非線形特性によるガンマ補正された光の三原色： $R'G'B'$

表3 実用的なカラー空間（カラーモデル）の特徴と相互比較

1. XYZ カラー空間：x-y 色度の計算	
〈線形的なカラー変換〉 XYZ カラー空間 ↑↓ RGB カラー空間	・光源の分光分布や分光反射率特性、スペクトルの三刺激値曲線データを利用して、三刺激値の計算ができる。 ・光源色や物体色の定量的な表示：x-y 色度計算ができる。
2. RGB カラー空間：一般的なカラー画像表示向き	
3次元的な直交座標系により RGB 成分の表示 コンピュータ用のディスプレイ機器：カラーCRT／LCDに広く利用 ・カラーキャナー ・カラービデオカメラ	・RGB 成分の輝度(明るさ)は、ディスプレイ機器によりお互いに相違する。 ・各カラーの単位輝度の変化は識別される色差に相当しない。 ・RGB カラー空間は色の見え方に関する分野で直接的に利用しにくい。
3. 輝度・色度分離形のカラー空間：カラー画像の圧縮・再生	
YUV YIQ YCb Cr YCl C2	・RGB 成分から簡便におおののカラー空間に変換できる。 ・デジタルカラー画像の圧縮・再生技法に利用できる。
4. 円柱座標系によるカラー空間：CG と応用 (3種類の等価的な座標系)	
IHS カラー空間 (円柱座標系) HLS カラー空間 (2つの6角錐台の組み合わせ) HSV カラー空間 (逆6角錐台) ここで、I：L：V：輝度(明るさ)、H：色相、S：彩度	・CG 向きで円柱座標系と等価的な座標系の応用により三属性を表示する。 ・RGB カラー空間に比較して、色の見え方が扱い易いが、三属性の変化が識別される色に比例しない。 ・RGB 信号により、各々のカラー三属性表示するために表示機器ごとに、カラー調整する必要がある。 ・感覚的に一つの属性の変化が他の二つの属性に影響を与える。
5. CIE カラー空間：定量的な色差の評価	
CIELAB (L*a*b*) CIELUV (L*u*v*)	・明度指数(明度関数)を使用する。 ・均等カラー空間で感覚的な色差が定量的に評価できる。

の数値を使用する場合にも適用できる。

参考文献

(1) 川上元郎：色のおはなし，日本規格協会（1992）。
(2) 照明学会編：ライティングハンドブック，オーム社（昭和62年）。
(3) 川上元郎他：実用色彩学，基礎の基礎，オプトロニクス社（平成6年）。
(4) S. J. Sangwine and R. E. N. Horne：The Colour Image Processing Handbook, Chapman & Hall（1998）。
(5) W. B. Pennebaker and J. L. Mitchell：JPEG Still Image Data Compression Standard, Van Nostrand Reinhold（1993）。
(6) D. Travis：Effective Color Displays, Theory and Practice, Academic Press（1991）。
(7) 飯塚昌之，中嶋芳雄：カラー画像表現とデジタル画像圧縮法，日本色彩学会誌，Vol.21，No.2，pp.88～89（1997）。

(8) L. W. MacDonald：Using Color Effectively in Computer Graphics, IEEE Computer Graphics, Vol.19, No.4 pp.20～35（1999）。
(9) D. Foley et al.：Computer Graphics：Principles and Practice, Addison-Wesley Pub. Co.（1990）。
(10) A. Watt：Fundamentals of Three-Dimensional Computer Graphics, Addison-Wesley Pub.Co.（1989）。
(11) 山本 強：The 3 Dimensional Computer Graphics, CQ出版（昭和58年）。
(12) 画像電子学会編：新版画像電子ハンドブック，コロナ社（1993）。
(13) Wyszecki and Stiles：Color Science：Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, John Wiley（1982）。
(14) K. B. Benson：Television Engineering Handbook, McGraw-Hil（1992）。
(15) J. Slater：Modern Television Systems to HDTV and beyond, Pitman（1991）。
(16) R. K. Jurgen：Digital Consumer Electronics Handbook, McGraw-Hill（1997）。
(17) R. L. De Valois and K. K. DeValois：A multi-stage color model, Vision Research, Vol.38(8), pp.1053～1065（1993）。
(18) M. M. Fleck et al.：Finding naked people, Proceedings of 4th European Conerence on Computer Vision（1996）。
(19) Y. Ohta, T. Kanade and T. Sakai：Color information for region segmentation, Computer Graphics and Image Processing, Vol.13, pp.222～241（1980）。
(20) R. C. Massen et al.：Real-time grey and colour image pre-processing for a vision guided biotechnology robot, Proceedings of the 7th International Conferenceon Robot Vision and Sensory Cotrols, pp.115～112（1988）。
(21) 日本色彩学会編：新編色彩科学ハンドブック；第2版，東京大学出版会（1998）。
(22) M. Miyahara and Y. Yoshida：Mathematical transform of (R, G, B) color data to Munsell (H, V, C) color data, Proceed-ings of SPIE, Vol.1001, pp.650～657（1988）。
(23) Kodak：A planning guide for developers, Photo CD Products, Rochester（1992）。
(24) CIE ed.：CIE NEWS, No.48 December（1998）。
<http://www.cie.co.at/cie/>；<http://www.colour.org>
(25) 矢口博久：CIEに新部会「画像技術」発足，日本色彩学会，Vol.23，No.2，pp.97～98（1999）。

著者紹介

飯塚 昌之

1940年生，1965年名古屋工業大学卒，名古屋工業大学勤務を経て，現在，東京工芸大学工学部・電子情報工学科教授。

中嶋 芳雄

1950年生，1980年東京工業大学大学院（総合理工学研究科物理情報工学専攻）博士課程修了，聖マリアンナ医科大学勤務を経て，現在，富山大学工学部・知能情報工学科教授。