

## 視覚系と表色系の関係

Quantitative Relation between Human Visual System  
and Colorimetric System

矢口 博久

Hirohisa Yaguchi

千葉大学工学部情報工学科

Department of Information and Computer Sciences, Chiba University

**Abstract** Recently many techniques have been developed to interconnect different types of color devices: CRT monitors, printers, photographic film and video recorders. It is very important, however, to recognize that the final evaluation of color appearance of an image of any media is performed by the human eye. The CIE colorimetric system is the only color specification system which can relate the spectral radiation information to the visual response. The colorimetric color reproduction is, therefore, the most applicable procedure to interconnect color informations among media. In this tutorial lecture, I talk about the quantitative relationship between the CIE colorimetric system and the human visual system.

## 1. はじめに

コンピュータシステム、電子画像表示システムの進歩により、写真、印刷、各種ハードコピー、CRTモニターなど異なるカラー表示デバイスの間での色情報の結合が行なわれるようになり、異なる画像メディア間で色を比較する場面が多くなった。そこで、メディアに独立な色再現が要求されるようになり、その方法、技術に関し、最近盛んに議論されている。しかし、ここで、画像に表示された色の評価は最終観察者である人間が行なうということを、再認識する必要があるのではないだろうか。現在のところ、人間の視覚系のメカニズムを定量的に取り入れている色表示系はCIE表色系だけである。CIE表色系は物理量と視覚の応答である色感覚を結び付けている唯一の表色系である。これが測色の色再現が理想とされる所以である。この講義では、人間の視覚系とCIE表色系の関係を定量的に述べると共に、現在の色再現システムの問題点さらに理想とする画像入力システムについて言及したい。

## 2. 等色関数とは

CIEの表色系を正確に理解するには、その導出過程を追えばよいが、これにはある程度の色彩学の知識が必要であり、また、逆に導出過程が複雑なため理解が難しい。これはCIE表色系の最大の欠点である。したがって、ここではCIE表色系の解釈のしかたについて述べる。

この表色系の基本は等色実験である。等色実験では図1のようにあるテスト色Cを3つの独立した(3つのうち2つの色光の混色によりもう一つの色光に等色できない)色光R,G,Bを混色し、色光R,G,Bの強度R,G,Bを調節することによりテスト色Cを混色光(R+G+B)で等色する。

この時の色光R,G,Bを原刺激と呼び、その強度R,G,Bを三刺激値と呼ぶ。CIE表色系はこの三刺激値により色を表記するシステムである。このような三刺激値による表色系は、(1)原刺激に何をを用いるか、(2)三刺激値の単位をどう決めるかの2点で定義することができる。

CIEのRGB表色系では原刺激として700 nm, 546.1 nm, 435.8 nmの単色光を用いること、そ

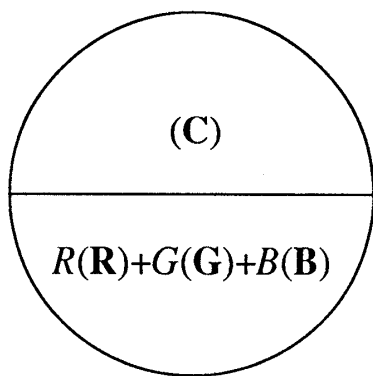


図1. 等色実験の原理

して等エネルギー白色（非波長選択性の分光分布をもつ白色光）の三刺激値が等しくなるように三刺激値を定義している。したがって、この定義による三刺激値の単位はエネルギー量でもなく、輝度でもない。しなみに三刺激値が等しい場合の原刺激のエネルギー比は

$$e_r : e_g : e_b = 72.1 : 1.4 : 1.0 \quad (1)$$

であり、輝度比は

$$l_r : l_g : l_b = 1.0 : 4.5907 : 0.0601 \quad (2)$$

である。世の中の光はほとんどが連続スペクトル分布をもつ複合放射であるが、どのような光も単色光を合成したものとして表されるので、単色光についての三刺激値が与えられれば、

（等色におけるグラスマンの法則のうち加法則が成立する範囲で）それらの全波長域での総和により複合放射の三刺激値を表すことができる。

そこで、単色光の三刺激値が重要になり、しかもそれが単位エネルギーの単色光の三刺激値であれば非常に便利である。これが等色関数 (color matching functions) である。CIE RGB表色系の等色関数  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$  を図2に示す。これを用いて、分光放射分布  $S(\lambda)$  をもつ複合放射の三刺激値は次式により得られる。

$$R = \int S(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

$$G = \int S(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

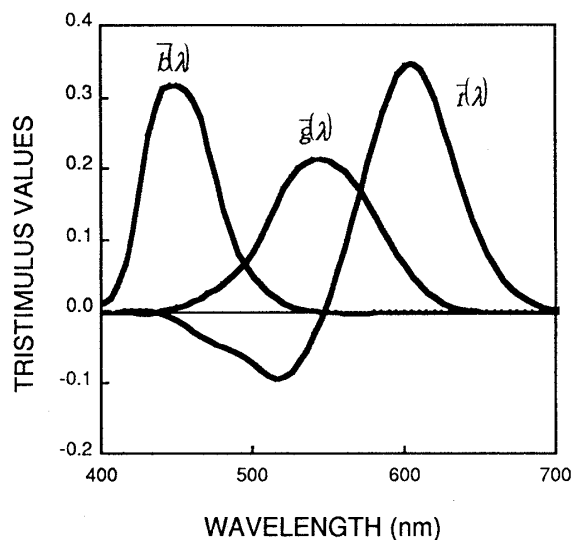


図2. CIE RGB表色系における等色関数

$$B = \int S(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

図3に示すように、この三刺激値を軸とするRGB空間において色のベクトルの方向だけを知りたい場合は、次式で定義される色度座標を用いる。

$$r = \frac{R}{R+G+B} \quad (6)$$

$$g = \frac{G}{R+G+B} \quad (7)$$

$$b = \frac{B}{R+G+B} \quad (8)$$

$$r + g + b = 1 \quad (9)$$

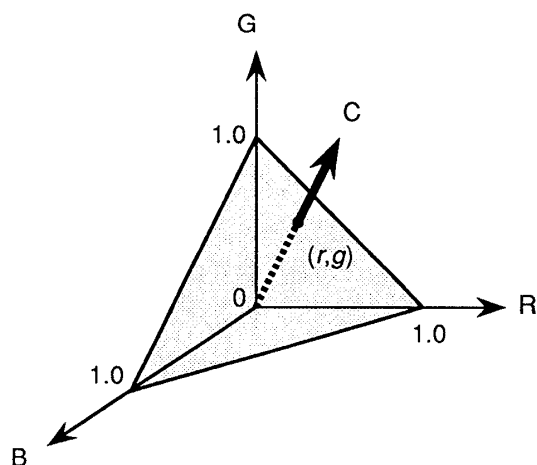


図3. 色度座標の概念図

(9)式の関係から2変数だけが分かればよく、一般には $r$ と $g$ だけが用いられ、これを $rg$ 色度図と呼んでいる。

しかし、このRGB表色系は実際にはあまり利用されておらず、代わりにXYZ表色系が利用されている。これには、RGB表色系は負の三刺激値があることや輝度の表現が複雑であることの大きくは2つの理由がある。XYZ表色系では図4に示すようにスペクトル軌跡を全て含むような三角形の頂点に色度座標をもつような原刺激 $X, Y, Z$ を用い、さらに $Y$ 三刺激値だけで輝度を表すために $XZ$ 平面が輝度0の面（無輝面）になるように原刺激を決めた。以上の条件を満足する原刺激 $X, Y, Z$ の $(r, g)$ 色度座標を以下に示す。

$X$	(1.2750, -0.2778)
$Y$	(-1.7392, 2.7671)
$Z$	(-0.7431, 0.1409)

このようにRGB表色系からXYZ表色系の変換は単に座標軸の変換であるので、次式で示すような線形変換で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.7689 & 1.7517 & 1.1302 \\ 1.0 & 4.5904 & 0.0601 \\ 0.0 & 0.0565 & 5.5943 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (10)$$

XYZ表色系の等色関数 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ を図5に示す。

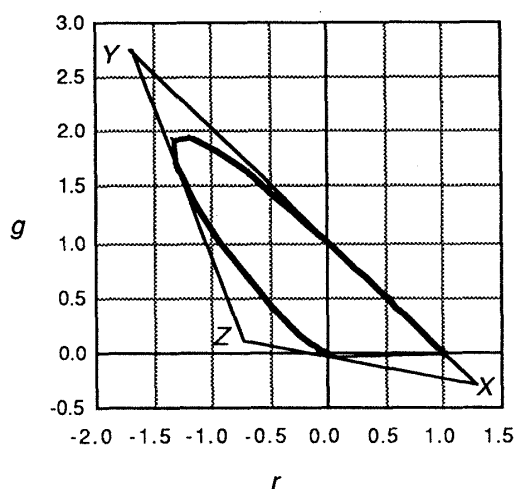


図4.  $rg$ 色度図におけるXYZ原刺激の位置

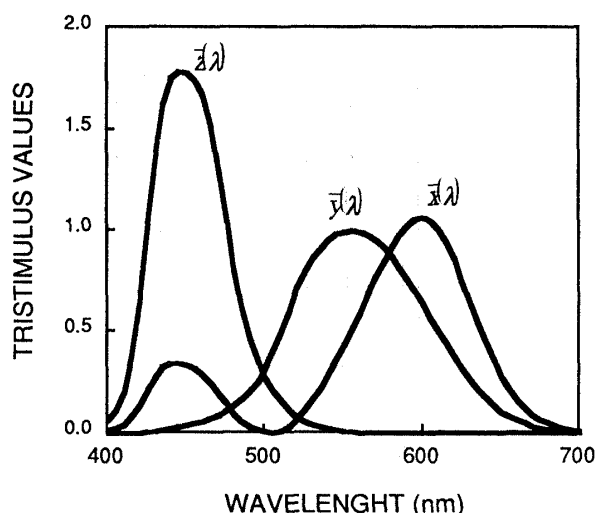


図5. CIE XYZ表色系の等色関数

### 3. 錐体の分光感度も等色関数のひとつ

等色実験について、次に視覚系のメカニズムの観点から眺めてみよう。波長 $\lambda$ の単色光をテスト光に用いた場合の等色は次式のように表すことができる。

$$L(\lambda)C(\lambda) = R(\lambda)R + G(\lambda)G + B(\lambda)B \quad (11)$$

ここで、 $L(\lambda)$ はテスト光のエネルギー、 $R(\lambda)$ ,  $G(\lambda)$ ,  $B(\lambda)$ は三刺激値である。また $\equiv$ は条件等色を表す。条件等色とは分光組成が異なっているにかかわらず等色が成立していることを意味する。これは視覚系の光受容細胞である網膜にある3種類の錐体の出力がテスト光と3つの原刺激の混色光の間でそれぞれ等しいことを意味している。そこで、(11)式の等色方程式をそれぞれの錐体の出力に関して表すと、

$$l(\lambda)L(\lambda) = l(\lambda_r)R(\lambda) + l(\lambda_g)G(\lambda) + l(\lambda_b)B(\lambda) \quad (12)$$

$$m(\lambda)L(\lambda) = m(\lambda_r)R(\lambda) + m(\lambda_g)G(\lambda) + m(\lambda_b)B(\lambda) \quad (13)$$

$$s(\lambda)L(\lambda) = s(\lambda_r)R(\lambda) + s(\lambda_g)G(\lambda) + s(\lambda_b)B(\lambda) \quad (14)$$

となる。図6に示すようにここでは3つの原刺激に単色光を用い、その波長を $\lambda_r, \lambda_g, \lambda_b$ とする。また3種類の錐体は、その分光感度のピーク波長の違いにより長波長感錐体（L錐体）、中波長感錐体（M錐体）、短波長感錐体（S錐体）と呼ばれ、 $l(\lambda), m(\lambda), s(\lambda)$ はそれぞれの錐体の分光感度を示す。一方、等色関数は単位エネルギー

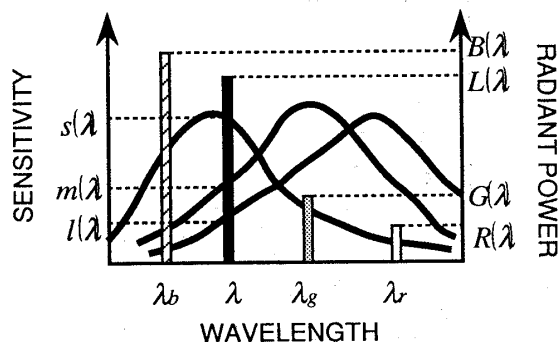


図6. 等色実験の刺激と錐体分光感度

一に対する三刺激値であるので次式で表せる.

$$\bar{r}(\lambda) = \frac{R(\lambda)}{L(\lambda)} \quad (15)$$

$$\bar{g}(\lambda) = \frac{G(\lambda)}{L(\lambda)} \quad (16)$$

$$\bar{b}(\lambda) = \frac{B(\lambda)}{L(\lambda)} \quad (17)$$

(12)から(14)式の両辺を $L(\lambda)$ で割ると次式が得られる.

$$\begin{bmatrix} l(\lambda) \\ m(\lambda) \\ s(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l(\lambda_r) & l(\lambda_g) & l(\lambda_b) \\ m(\lambda_r) & m(\lambda_g) & m(\lambda_b) \\ s(\lambda_r) & s(\lambda_g) & s(\lambda_b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{bmatrix} \quad (18)$$

すなわち、錐体の分光感度は等色関数の線形変換で表せることを意味し、これは図7に示すように色空間における座標軸の変換と考えることができる。また錐体の分光感度曲線を図8に示す。ここでは最大値が1になるように正規化してある。この錐体の分光感度は、負の値をもたず単一のピークでしかもオーバーラップがもっとも少ない条件で数学的に得られる等色関数<sup>1)</sup>とほぼ一致する。図7においてL, M, SはL錐体, M錐体, S錐体の応答であるが、これを原刺激とみると、例えばL軸はL錐体だけが反応するような刺激の色空間におけるベクトルである。M軸, S軸についても、それぞれM錐体, S錐体だけが応答するような刺激のベクトルである。図8から明らかなように錐体の分光感度は互いに全波長域においてオーバーラップしているので、単一の錐体だけを反応させるような刺激は

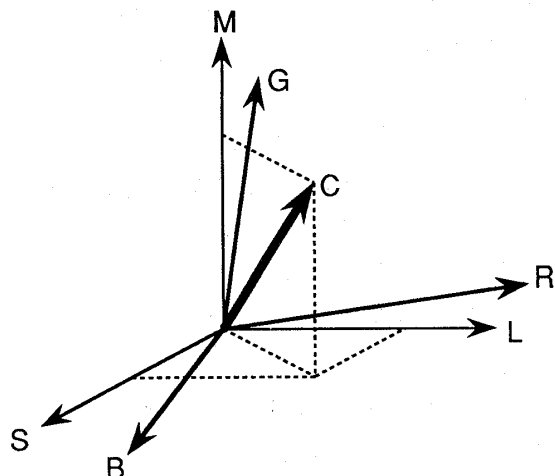


図7. 色空間における座標軸の変換

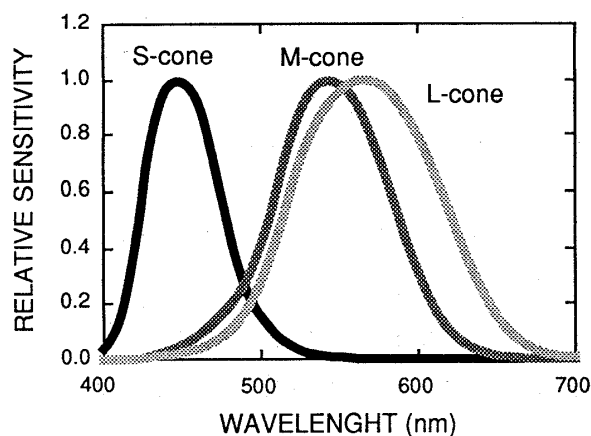


図8. 錐体の分光感度

実際には存在しない。しかし、このように考えると錐体の分光感度を等色関数のひとつとして、また錐体応答を三刺激値のひとつとして捉えることができる。すなわち、色を錐体の応答で表現することも可能である。近い将来にこのような錐体応答に基づいた表色系が確立されるであろう。実際にCIEではこのための技術委員会ができており、標準化のための審議が続いている。

4. CIELAB, CIELUVは必ずしも均等にあらざる画像の色再現を評価する場合、目標とする色に対し実現した色がどのくらい異なっているか、

つまり色差を用いる。感覚的な色差ができるだけ等間隔になるように作られた色空間を均等色空間という。現在CIEでは2つの均等色空間を制定している。CIE1976L\*u\*v\* (CIELUV)とCIE1976L\*a\*b\* (CIELAB)である。CIELUVは均等色度図をもち、その色度座標( $u', v'$ )は次式によりX, Y, Z三刺激値あるいは( $x, y$ )色度座標から得られる。

$$u' = \frac{4X}{X+15Y+3Z} = \frac{4x}{-2x+12y+3} \quad (19)$$

$$v' = \frac{9Y}{X+15Y+3Z} = \frac{9y}{-2x+12y+3} \quad (20)$$

均等色度図では等明るさ面についての色識別を取り扱っているにすぎないので、これを明るさの異なるところまで拡張して3次元の色空間において色差を評価できるような均等色空間として次に定義されるようなL\*u\*v\*空間が考案された。

$$L^* = 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{\beta}} - 16 \quad (21)$$

$$u^* = 13L^* (u' - u'_n) \quad (22)$$

$$v^* = 13L^* (v' - v'_n) \quad (23)$$

またCIELABについては $L^*$ は(21)と同じで、

$$a^* = 500 \left[ \left( \frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{\beta}} - \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{\beta}} \right] \quad (24)$$

$$b^* = 200 \left[ \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{\beta}} - \left( \frac{Z}{Z_n} \right)^{\frac{1}{\beta}} \right] \quad (25)$$

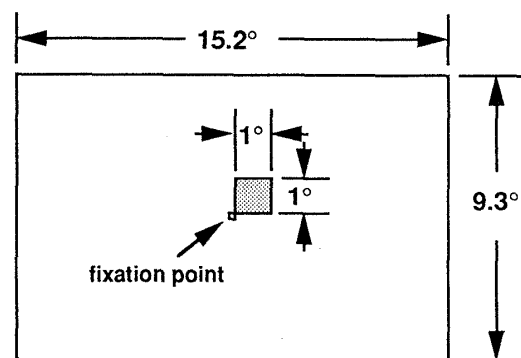
と定義されている。これらの均等色空間は厳密には物体色だけに適用できるものであり、 $X_n, Y_n, Z_n, u'_n, v'_n$ は基準白色面のXYZ三刺激値および $u', v'$ 値である。そしてCIELUV, CIELABでの色差は次式により定義される。

$$\Delta E_{uv}^* = \left[ (\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

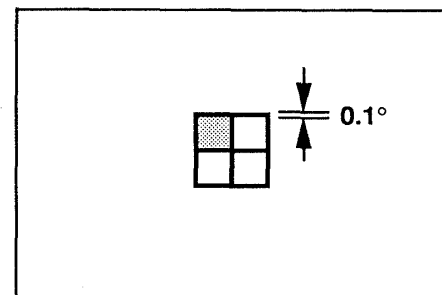
$$\Delta E_{ab}^* = \left[ (\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

この $\Delta E_{uv}^*, \Delta E_{ab}^*$ にある許容値を目的に応じて設定して画像の色再現の評価を行なっているのが現状である。

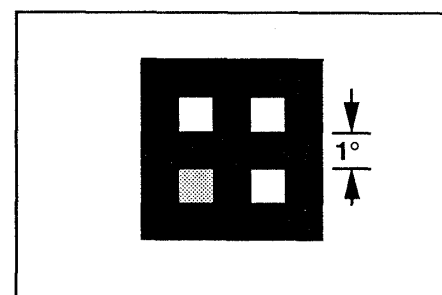
我々は均等色空間の均等性を検証するために、D65近似の白色からの色弁別閾を測定した。実験にはRGB各12 bitsをもつコンピュータ制御のCRTを用いた。図9に示すように、3種類の刺



(a)



(b)



(c)

図9. 色弁別閾値測定における刺激呈示条件

激呈示を用いた。CRT画面ほぼ全面にD65（輝度15 cd/m<sup>2</sup>）近似の白色が呈示されており、その中心に固視点が設けられている。(a)の条件では固視点の周りの右上、右下、左下、左上の4箇所はどこか1つに背景のD65とは僅かに色の異なる1° 正方のテスト刺激が200 msec呈示される。被験者はその位置を応答する。閾値は階段法によって求めた。(b), (c)の条件では背景とテスト刺激をそれぞれ0.1°, 1° の暗黒の隙間により隔てた。色空間におけるテスト刺激のD65からの方向、29方向について弁別閾値を測

表 1. 色弁別閾値における色差

Test stimulus (R, G, B) without gap	$\Delta E_{uv}^*$			$\Delta E_{ab}^*$		
	0.1°	1°	without gap	0.1°	1°	without gap
(1, 0, 0)	1.27	1.45	2.77	0.85	0.97	1.84
(-1, 0, 0)	1.13	1.39	3.13	0.76	0.93	2.11
(0, 1, 0)	0.96	1.73	3.26	0.81	1.46	2.76
(0, -1, 0)	1.09	1.74	2.67	0.92	1.48	2.27
(0, 0, 1)	3.03	4.55	6.76	2.16	3.23	4.78
(0, 0, -1)	3.62	4.21	6.32	2.61	3.04	4.59
(1, 1, 1)	0.25	0.84	1.85	0.24	0.82	1.80
(-1,-1,-1)	0.35	0.78	1.59	0.34	0.75	1.55

定した．表 1 にそのうちの 8 方向の閾値における色差  $\Delta E_{uv}^*$ ,  $\Delta E_{ab}^*$  を示す．ここでは基準白色を CRT での呈示できる最大輝度 (57.3 cd/m<sup>2</sup>) の D65 を用いた．均等性がよければ全ての方法で等しい色差が得られるはずであるが，R, G, B 原色全てが増加あるいは減少する方向，すなわち色は変わらず輝度のみが変化する方向では閾値における色差が小さいことがわかる．また，刺激の空間的呈示条件によっても閾値における色差が変化している．

以上のことから，画像の色再現の評価に色差を用いる場合には，画像の空間的構造にも色弁別が依存することを考慮して許容色差などを設定することが望ましい．また，輝度変化，色度変化が混在するような条件で  $\Delta E_{uv}^*$ ,  $\Delta E_{ab}^*$  の色差を用いる場合は均等色空間は必ずしも均等でないことを認識する必要がある．

## 5. 理想的な色彩画像システム

以上のような観点から色彩画像システムの在り方を考えてみると，やはり視覚のメカニズムを考慮した測色的色再現が理想といえる．しかし，現在の各種画像メディアの色再現システムは必ずしも測色的色再現を満足するように設計されていない．問題は画像入力系にあると思われる．

銀塩カラー写真においては色情報の入力，記

録，処理，表示をフィルム上で全て行なっている．色再現の設計は難しいが，入力系であるフィルムの分光感度を錐体の分光感度に近づけると色再現性が向上される可能性がある．

カラーテレビでは周知のようにアメリカ，日本では NTSC 方式が標準方式として採用されている．NTSC 方式では CRT の 3 原色の標準色度座標が規定されており，これを原刺激とした時の等色関数を撮像系の分光感度として設計されている．しかし現在の CRT では NTSC 方式の原色を用いているものはほとんど無く，忠実な測色的色再現は期待できない．もし，撮像系が CIE の三刺激値の情報が得られるようなシステムであれば，ディスプレイ原色がいかなるものでも対応できる．

印刷の分野では，写真フィルムなどのカラー原稿から色情報を取り込むスキャナの設計が重要になる．ここでも，また測色濃度が得られるようなルーター条件を満足したシステムが理想である．原稿の三刺激値が得られれば，ディスプレイ原色であるインクの三刺激値をもとに理論的（Neugebauer 方程式の利用<sup>2)</sup>など）に CMYK 値を求める手立てもある．しかし，インクジェット，熱転写などのプリンターに適応するのは難しいとされている．しかし，新しい方式のプリンターに関しても測色的色再現を目標とするような理論の開発が望まれる．

## 6. おわりに

人間の視覚系と現在の表色系の関係を解説し、現在の各画像メディアの色再現の問題点などを述べたが、各メディアを結ぶのは人間の眼であることを認識することが重要であり、将来は色再現の設計に人間の視覚系の色彩情報処理を積極的に取り入れることを望みたい。最後に、測色値を得られる画像入力装置（できれば錐体の分光感度をもつ撮影、記録装置）の出現を期待してこのレクチャーを終わりたい。

## 参考文献

- (1) N.Ohta, Practical Transformation of CIE Color-Matching Functions, *Color Res. Appl.* 7, 53-56 (1982).
- (2) 佐柳和男, 色再現理論の展開, 日本印刷学会論文集, 24, 1-9 (1986).