



画像における色再現の設計

久保 走 一

千葉大学工学部画像工学科 〒260 千葉市弥生町 1-33

(1984年4月2日受理)

Design of Color Reproduction for Color Imaging Systems

Souichi KUBO

Department of Image Sciences and Engineering, Faculty of Engineering,
Chiba University, 1-33, Yayoi-cho, Chiba 260

1. ま え が き

画像システムとして色再現を可能にした最初のものはカラー写真(1861年)であった。当時、B. J. Maxwellは色覚の三原色説を実証する目的で、写真家 T. Suttonの協力を得て、カラー写真のデモンストレーションを行った。

T. Suttonの記録によれば、撮影における色分解と、画像の再生には同じ三色フィルターが用いられていた¹⁾。

この時代には、銀塩写真感光材料のスペクトル増感の技術はなかったので、色分解は近紫外領域で偶然に行なわれた不完全なものであったが、ある程度の色再現が可能であった。撮影における三色分解フィルターとカラー画像のディスプレイ用の三色フィルターに同じものが使用されることは、測色的色再現の概念から考えれば誤りとされる。

現在では、カラー画像における色再現は

i) 分光色再現 (spectral color reproduction): 分光反射あるいは相対分光反射が被写体と等しい再現画像に関するもので、通常の場合、この色再現は達成できない。色再現システムの条件等色の度合いについて有用な基礎を与える。

ii) 測色的色再現 (colorimetric color reproduction): 色度と絶対輝度が被写体と同等な再現をいう。オリジナルと再現画像が同じ観察条件のもとにあり、同じ色温度の照明が用いられるとき有用な規準となる。この観察と照明の条件は、普通の場合、反射プリントの観察・照明

条件とはほぼ等しい。

iii) 正確な色再現 (exact color reproduction): 色度と絶対輝度が被写体と同等である再現をいう。オリジナルと再現画像の観察条件が等しい場合、両者における色の見え方の同等性を保証する。しかし、絶対輝度が同等である再現は非常にまれである。

iv) 等価色再現 (equivalent color reproduction): 色の見え方の同等性を保証する色度と絶対輝度の再現をいう。

v) 対応色再現 (corresponding color reproduction): 被写体と再現画像の輝度レベルが等しいとき、色の見え方の同等性を保証するような色度と相対輝度をもつ再現をいう。

vi) 好ましい色再現 (preferred color reproduction): よく色を知られている幾つかの被写体について、より好まれる再現を達成するために、同等な色の見え方からの隔たりが要求される再現をいう。などの範疇に分類される^{2,3)}。

これらの色再現のうち、画像システムの色彩設計として規準的な尺度となり、また表色系を応用することによって設計上の数値取扱いが容易なもの測色的色再現である。実際のカラー画像では観察条件などの生理的要因あるいは色の記憶、嗜好などの心理的要因により、測色的色再現からの隔りが要求されることが考えられる。しかし、ここでは規準尺度として測色的色再現を中心に画像システムの設計における色彩の問題を考えることにする。

2. 色再現の設計と表色系の概念

相互に独立である三つの単色光 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ の加法混色によってほとんどの色が得られることはよく知られている。したがって、任意の色 (色刺激, color stimulus) は三つの原色 (原刺激, primary stimuli) の混合量によって表わすことができる。色刺激を F , 原刺激を R, G, B , 原刺激の混合量を m_1, m_2, m_3 とすれば、色刺激 F は $F \equiv m_1R + m_2G + m_3B$ で等色される。刺激純度の高い色刺激のうちのあるものは、原刺激の正量混合だけでは等色されず、 $F + m_2G \equiv m_1R + m_3B$, すなわち $F \equiv m_1R - m_2G + m_3B$ の負量混合を必要とする。

現在、最も一般的に用いられる CIE 表色系⁴⁾は、加法混色を基礎にして原刺激と基礎刺激 (basic stimulus, 白色に相当) を定めることにより成立する。これは画像システムの色再現において、たとえばカラーテレビジョンにおける CRT の3色 R, G, B を原刺激、 $W \equiv R + G + B$ を基礎刺激とし原刺激の単位量の混合と考え、ある特定の色刺激 F_λ について $F_\lambda \equiv m_{1\lambda}R + m_{2\lambda}G + m_{3\lambda}B$ として等色することができる。これを波長領域で考えれば $F(\lambda) \equiv m_1(\lambda)R + m_2(\lambda)G + m_3(\lambda)B$ であるから $\bar{m}_1(\lambda), \bar{m}_2(\lambda), \bar{m}_3(\lambda)$ は撮像における分光感度分布である。

CIE 表色系では、原刺激を $R=700\text{nm}, G=546.3\text{nm}, B=435.8\text{nm}$ の単色光として、スペクトル色に対し $F(\lambda) \equiv \bar{r}(\lambda)R + \bar{g}(\lambda)G + \bar{b}(\lambda)B$ のように等色して構成された RGB 表色系を基礎に、新しい原刺激として虚色刺激 (imaginary stimuli) X, Y, Z を定め、等色関数から負量を除き取扱いの容易な XYZ 表色系がある。表色系に関しては前掲 4) の参考文献のほかにもおなじみとして Wyszecki, Stiles, Judd, 日置, 池田らの著書⁵⁻⁸⁾があるので詳しくはこれらを参照されるとよい。

表色系の考え方を画像システムの色再現設計に導入すれば、画像再現のための三原色 R, G, B から撮影(像)に要求される分光感度分布を決定することができる。この決定は、画像再現の三原色を新しい原刺激として既存の表色系の一次変換により容易に行なうことができる。

3. 画像再現のための三原色 (display primaries)

画像システムにおいて、測色的色再現を設計するためには、まず画像再現のための三原色を決定しなければならない。この三原色は、基本的には加法混色の三原色 (R, G, B) であるが、減法混色の三原色 (cyan, magenta, yellow) を用いる系では $W - c = R, W - m = G, W - y$

$= B$ すなわち c, m, y がそれぞれ制御する補色を考え、両者とも加法混色のシステムとして取り扱うことができる。

カラーテレビジョンでは、CRT の3種の蛍光体が発する R, G, B が画像再現のための原色となる。NTSC 方式では ($R: x=0.67, y=0.33, G: x=0.21, y=0.71, B: x=0.14, y=0.08$) が原色として定められている⁹⁾。規定の上では、これらの原色は輝度の変化にかかわらず一定の色度座標をもつ安定原色 (stable primaries) である。実用の CRT では、必ずしも NTSC の三原色とは一致せず、また発光の輝度によって色度座標も変化する。しかし、後述のカラー写真、カラー印刷などに比較すれば安定な原色に属している (図 1)。

カラー写真では、ふつう、減法混色の三原色に相当する色素が使われる。これらの色素 c, m, y の分光透過 $T_c(\lambda), T_m(\lambda), T_y(\lambda)$ を求め、特定の観察光源のもとにおける CIE 1931 表色系の色度座標を計算すると図 2 のグリッドが得られる。これから、減法混色の三原色 c, m, y がそれぞれ制御する原色 R, G, B が定まる。この原色 R, G, B は、図から明らかのように、 c の濃度変化による色度座標の変化 $W \rightarrow c$ に伴って R は $W \rightarrow R$ の間で色度座標の変化を示し、 G, B も同様に m, y の変化に伴う変化を示すので、ともに主波長、刺激純度が安定しない不安定原色 (unstable primaries) となる¹⁰⁾。

カラー印刷などドット画像の場合では、単位面積中に減法混色のインクドットが占める面積の割合をそれぞれ c, m, y とすれば $R \rightarrow my(1-c), G \rightarrow cy(1-m), B \rightarrow$

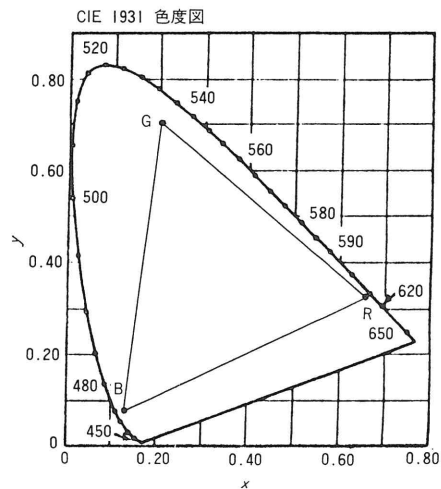


図 1 テレビジョンの画像再現原色に関する色度座標 (NTSC) R, G, B の正量混合では色再現域は ΔRGB の内側となる。

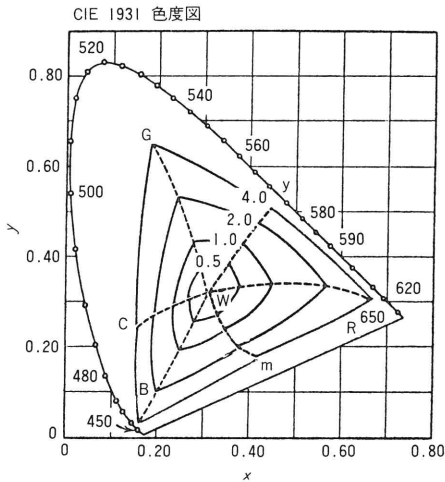


図2 カラー写真など減法混色の原色による色再現域¹⁾
 図中の 4.0, 2.0, 1.0, 0.5 は色素の光学濃度 ($D = -\log_{10} T$) を表わす。

$cm(1-y)$ として、 c, m, y に対応する原色 R, G, B が求められる^{11,12)}。同様に、ドットマトリクスにおいても、インクの占める面積比によって画像再現の原色が定まる。この場合も不安定原色である。

4. 測色の色再現のための撮影(像)系の分光感度

画像再現に用いる原色 R, G, B が定まれば、可視域内の単色光に等色するために必要な原色の混合量を、視覚による等色実験を通して求めることができる。この混合量の比は撮影(像)系における3種の分光感度の比に等しい。同時に、この混合量は表色系における等色関数である。したがって、もし画像システムの原色を表色系の原刺激と等しくするならば、その表色系の等色関数はそのまま撮影(像)の分光感度となる。実用の CIE XYZ 表色系の原刺激 X, Y, Z は虚色刺激であり、実在しない原色であるから、これを画像システムの原色とすることはできない。

ここに、画像再現の原色 R, G, B の XYZ 表色系における色度座標 $(x_r, y_r, z_r), (x_g, y_g, z_g), (x_b, y_b, z_b)$ を求めれば、 R, G, B を原刺激とする新しい表色系に XYZ 表色系を変換することができる。この変換は、表色系では等エネルギーの白色を基本刺激とすることで単純化されるが、画像システムでは画像再現における規準白色、たとえば CRT の白色、ベースペーパーと照明によって作られる白色など、を設計に考慮する必要がある。

したがって、規準白色によって決定される係数 K_1, K_2, K_3 を含み、つぎのように R, G, B と X, Y, Z の関係を表わすことができる¹³⁾。

$$\begin{aligned} R &= K_1(x_r X + y_r Y + z_r Z) \\ G &= K_2(x_g X + y_g Y + z_g Z) \\ B &= K_3(x_b X + y_b Y + z_b Z) \end{aligned} \quad (1)$$

規準白色の色度座標 (x_w, y_w, z_w) が定まれば

$$R + G + B = x_w X + y_w Y + z_w Z \quad (2)$$

と書くことができる。 x_w, y_w, z_w は、たとえばカラーテレビジョンでは CRT の白色の色度座標、カラープリントのような反射画像では照明の分光分布 $P_o(\lambda)$ とベースペーパーの分光反射 $T_o(\lambda)$ から計算される CIE 三刺激値 X_w, Y_w, Z_w から求められる色度座標、また、スクリーンに投影される画像では投影光の分光分布 $P_o'(\lambda)$ 、画像中の規準白色部分の分光透過 $T'_w(\lambda)$ 、スクリーンの分光反射 $T_s(\lambda)$ から計算される CIE 三刺激値 X_w, Y_w, Z_w から求められる色度座標である。ここに、(1)式を(2)式に代入すると

$$\begin{aligned} K_1(x_r X + y_r Y + z_r Z) + K_2(x_g X + y_g Y + z_g Z) \\ + K_3(x_b X + y_b Y + z_b Z) = x_w X + y_w Y + z_w Z \end{aligned}$$

が得られる。この式の両辺の X, Y, Z に関する係数は等しくならなければならないから、

$$\begin{aligned} K_1 x_r + K_2 x_g + K_3 x_b &= x_w \\ K_1 y_r + K_2 y_g + K_3 y_b &= y_w \\ K_1 z_r + K_2 z_g + K_3 z_b &= z_w \end{aligned} \quad (3)$$

の関係となる。この式を解けば K_1, K_2, K_3 が得られる。

この場合、色度座標のそれぞれの数値は、画像再現の原色、規準白色によって具体的に知られている。

ある単色光 λ は、XYZ 表色系では等色関数 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ を用いて $\lambda = \bar{x}(\lambda)X + \bar{y}(\lambda)Y + \bar{z}(\lambda)Z$ で表わすことができる。ここに設計しようとする画像システムでは、原色 R, G, B と分光感度 $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ を用いて $\lambda = \bar{r}(\lambda)R + \bar{g}(\lambda)G + \bar{b}(\lambda)B$ で表わされなければならない。したがって $\bar{x}(\lambda)X + \bar{y}(\lambda)Y + \bar{z}(\lambda)Z = \bar{r}(\lambda)R + \bar{g}(\lambda)G + \bar{b}(\lambda)B$ となる。この式に(1)式を代入すると

$$\begin{aligned} \bar{r}(\lambda)K_1(x_r X + y_r Y + z_r Z) + \bar{g}(\lambda)K_2(x_g X + y_g Y + z_g Z) \\ + \bar{b}(\lambda)K_3(x_b X + y_b Y + z_b Z) = \bar{x}(\lambda)X + \bar{y}(\lambda)Y + \bar{z}(\lambda)Z \end{aligned}$$

が得られる。式(3)を導いたように上式は次のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} K_1 x_r \bar{r}(\lambda) + K_2 x_g \bar{g}(\lambda) + K_3 x_b \bar{b}(\lambda) &= \bar{x}(\lambda) \\ K_1 y_r \bar{r}(\lambda) + K_2 y_g \bar{g}(\lambda) + K_3 y_b \bar{b}(\lambda) &= \bar{y}(\lambda) \\ K_1 z_r \bar{r}(\lambda) + K_2 z_g \bar{g}(\lambda) + K_3 z_b \bar{b}(\lambda) &= \bar{z}(\lambda) \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式を $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ について解けば次の関係が得られる。

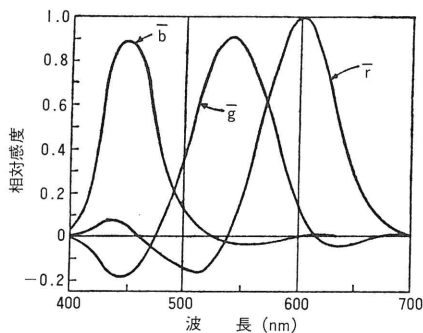


図 3 図 1 の画像再現原色を用い測色的色再現を目標とする画像システムの撮像系に要求される分光感度分布¹³⁾

$$\begin{aligned} \bar{r}(\lambda) &= K_2 K_3 \{ (z_0 z_b - z_0 y_b) \bar{x}(\lambda) + (z_0 x_b - x_0 z_b) \bar{y}(\lambda) \\ &\quad + (x_0 y_b - y_0 x_b) \bar{z}(\lambda) \} \\ \bar{g}(\lambda) &= K_1 K_3 \{ (z_r z_b - y_r z_b) \bar{x}(\lambda) + (x_r z_b - z_r x_b) \bar{y}(\lambda) \\ &\quad + (y_r x_b - x_r y_b) \bar{z}(\lambda) \} \\ \bar{b}(\lambda) &= K_1 K_2 \{ (y_r z_0 - z_r y_0) \bar{x}(\lambda) + (z_r x_0 - x_r z_0) \bar{y}(\lambda) \\ &\quad + (x_r y_0 - y_r x_0) \bar{z}(\lambda) \} \end{aligned}$$

上式に、すでに知られている画像再現原色の色度座標の数値、式(3)を解いて得た K_1, K_2, K_3 の数値、CIE によって定められている XYZ 系の等色関数の数値を代入し、可視域の全域をたとえば 5 nm あるいは 10 nm ごとに分割して $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ を計算すれば、その画像システムが測色的色再現をするために要求される撮影(像)系の分光感度分布を求めることができる。

ただし、この変換は一次式によっている。つまり、画像システムの(入力:出力)変換特性が直線的であり、その傾斜も $\gamma=1$ を想定している。実際の画像システムではこの条件は満足されない。したがって、なんらかの妥協あるいは実用的な補正を必要とする。また、図 1 に示される画像再現原色を用い、測色的色再現(すなわち、オリジナルと再現色の CIE 三刺激値が等しいか、あるいはある一定の比例関係にある再現)を目標として設計される画像システムでは図 3 に示す分光感度分布が要求される。しかし、実際のシステムでは負感度の実現はできないので実用的な補正が行なわれる¹³⁾。

5. Ives-Abney-Yule の妥協

測色的色再現を目的として画像システムを設計して得られた分光感度に負感度が要求される波長域があり、負感度を実現できない場合、その画像システムに可能な色再現は画像再現原色 R, G, B の正量混合の範囲、すなわち R, G, B を頂角とする三角形の範囲に限定される。

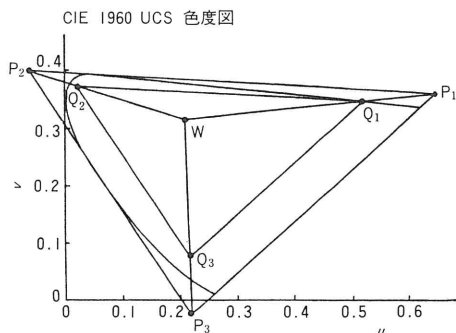


図 4 仮定の原色 P_1, P_2, P_3 と画像再現原色 Q_1, Q_2, Q_3 との関係¹⁵⁾

分光感度に負感度をもたせないためには、画像再現原色を頂角とする三角形が色度図の全域を包み込めばよい。

いま、画像再現原色を図 4 に従って Q_1, Q_2, Q_3 とする。規準白色 W と Q_1, Q_2, Q_3 を結ぶ直線上に新しい原色 P_1, P_2, P_3 を考え、 $\Delta P_1, P_2, P_3$ が色度図を包むようにする。新しい原色 P_1, P_2, P_3 はスペクトル軌跡の外側に存在するので実在の原色ではないが、実在する原色 Q_1, Q_2, Q_3 をそれぞれ P_1, P_2, P_3 と規準白色 W との混色として考えることができる。本来は画像再現原色が P_1, P_2, P_3 であるが実在する原色は刺激純度が低下した Q_1, Q_2, Q_3 であるとすれば、画像システムが測色的色再現の系として設計される場合、分光感度の計算を P_1, P_2, P_3 を基礎にして行なっても誤りではない。このような計算の結果、負感度をもたない図 5 の分光感度が得られる。この分光感度は画像システムとして実現が可能であり、測色的色再現の系を設計する上で理論的な矛盾がない。しかし、実在の原色は仮定の原色 P_1, P_2, P_3 に対して刺激純度の低い Q_1, Q_2, Q_3 であるから、図 5 に示す分光感度で撮影(像)し Q_1, Q_2, Q_3 で画像再現をする系では図 6 のような刺激純度の低下を示すことになる。この

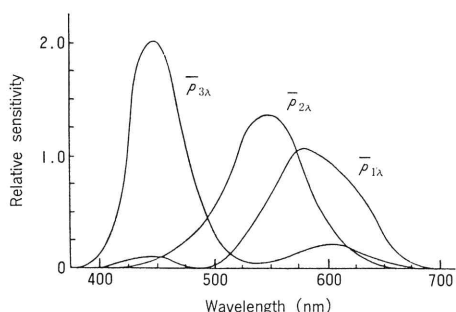


図 5 図 4 の仮定の原色 P_1, P_2, P_3 を基礎に計算される分光感度分布¹⁵⁾

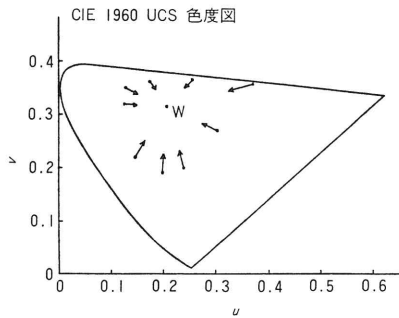


図6 図5の分光感度で撮影(像)し図4の原色 Q_1, Q_2, Q_3 で画像を再現した場合に生ずるエラー¹⁵⁾

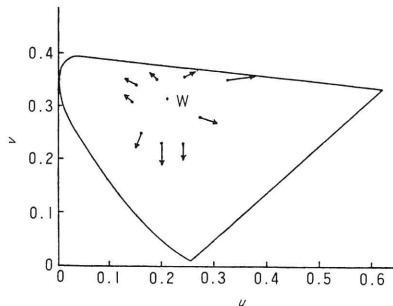


図7 画像システムの γ 値を1.0から1.5に上昇させると再現色の刺激純度の低下が改善される¹⁵⁾

再現上のエラーを除くためには、画像システムの γ 値を大きくすることが考えられる。たとえば、 γ 値を $\gamma=1.5$ に上昇させた画像システムでは図7のように再現エラーが補正され、再現色の刺激純度は向上する。このようにすれば、測色的色再現を目的とする画像システムの設計において、画像再現原色と分光感度分布との関係に矛盾をもたない。しかし、 γ 値を大きくとることが必要となる。また、最終的に色再現域は $\Delta Q_1, Q_2, Q_3$ の内側に限局される。色再現系の構成に対するこのようなアプローチを Ives-Abney-Yule の compromise と呼んでいる¹¹⁾。この考え方による設計を行えば、再現色の主波長のエラーを伴わずに刺激純度を上昇させることができる。

6. 実際の画像システムにおける問題

カラー画像システムにおける色再現設計の基本的尺度として測色的色再現を考えることは、システムの理論的構成、数値上の取扱いなどの点で有利である。しかし、実際の画像システムでは、ほとんどの場合、画像再現に

用いられる原色は不安定原色であり、入出力変換特性は非線形である。したがって、原色に基づいて撮影(像)の分光感度を求めることを一義的に行なうことはできない。

また、再現された画像の観察条件はオリジナルと再現色の見え方の一致に対して大きな要因となる。再現された画像の観察照明とオリジナルに対する照明が一致していることを測色的色再現では基本的条件としている。色材を用いる色画像では再現色はオリジナルに対して条件等色であるから、観察用照明の分光組成が変わると色の見え方も変化する。多くの場合、撮影(像)と再現画像の観察における照明は一致しない。したがって、観察照明の違いによる色の見え方を予測して、その補正を設計に含めることが要求される¹⁴⁻¹⁶⁾。観察照明の相違による色順応の変化および色の見え方の相違を数式的に変換、予測することが最近多く報告されている¹⁷⁻²¹⁾。また、色順応の研究に関する概説に Wright の記述がある²²⁾。

カラー画像の観察において、周辺の明暗ならびに色彩の条件は、色再現の評価に影響を与える^{2, 23, 24)}。同時に周辺条件は再現画像の明暗のトーンに関する見え方に影響する²⁵⁻²⁷⁾。

以上の観察条件に伴う生理的要因と、再現色として好ましい色に対する心理的要因²⁸⁻³¹⁾とを考慮することが、カラー画像システムの設計には要求される。

実際のカラー画像システムを組み立てる材料の特性は設計における理論的要求を満足しない。したがって、材料的制約の中でよりよい色再現を達成するために多くの試みがなされている。カラー写真について、減法混色の色素と色再現域³²⁻³⁵⁾、実際面において適切と考えられる分光感度分布^{36, 37)}など、この分野に関する大田の精力的な一連の研究がある。大田による概説^{38, 39)}から主論文を参照されるとよい。

7. おわりに

画像システムにおける色再現の設計には、システムに用いられる材料特性等の制約とともに、観察者の生理的、心理的要因までを考慮しなければならない。これは、相互にきわめて複雑に影響し合うので、単純化した設計基盤を得ることは困難である。したがって、画像システムの計算モデルによるシミュレーションを基盤とした設計が実用化されている⁴⁰⁾。

以上、おもに写真システムに片寄った解説となったが筆者の専門の関係でお許しをいただきたい。材料的な側面を除けば、色再現は多くの画像システムに共通な問題

であろう。紙面の関係で十分な解説とはなっていないが、原論文を参照されることを願うものである。

文 献

- 1) R. M. Evans: Some notes on Maxwell's colour reproduction. *J. Photogr. Sci. Eng.*, **9** (1961) 243.
- 2) R. W. G. Hunt: Objectives in colour reproduction. *J. Photogr. Sci.*, **18** (1970) 205.
- 3) 久保走一: 日写誌, **38** (1979) 379.
- 4) 納谷嘉信: 測色の基礎. 光学, **10** (1981) 51, 203, 281, 385; **11** (1982) 200, 317.
- 5) G. Wyszecki and W. S. Stiles: *Color Science* (John Wiley & Sons, New York, 1967).
- 6) D. B. Judd and G. Wyszecki: *Color in Business, Science and Industry*, 3rd ed. (John Wiley & Sons, New York, 1975).
- 7) 日置隆一: 表色系, 色彩科学ハンドブック, 日本色彩学会編 (東京大学出版会, 東京, 1980) p. 83.
- 8) 池田光男: 視覚の心理物理, 最新応用物理学シリーズ 3 (森北出版, 東京, 1979).
- 9) 日本放送協会編: カラーテレビジョン (1961) p. 178.
- 10) R. M. Evans, W. T. Hanson, Jr. and W. L. Brewer: *Principles of Color Photography* (John Wiley & Sons, New York, 1953) p. 632.
- 11) R. W. G. Hunt: *The Reproduction of Colour in Photography, Prints and Television* (Fountain Press, London, 1975) pp. 89, 524.
- 12) J. A. C. Yule: *Principles of Color Reproduction* (John Wiley & Sons, New York, 1967) p. 225.
- 13) J. W. Wentworth: カラーテレビジョン, 鈴木桂二訳, (無線従事者教育協会出版, 東京, 1959) pp. 127, 132.
- 14) R. W. G. Hunt: Chromatic adaptation in image reproduction. *J. Color Res. Appl.*, **7** (1982) 46.
- 15) R. W. G. Hunt and L. M. Winter: Colour adaptation in picture-viewing situation. *J. Photogr. Sci.*, **23** (1975) 112.
- 16) R. W. G. Hunt: The specification of colour appearance. II Effect of changes in viewing conditions. *J. Color Res. Appl.*, **2** (1977) 109.
- 17) C. J. Bertleson: Comparison of chromatic-adaptation transforms. *J. Color Res. Appl.*, **3** (1978) 129.
- 18) C. J. Bertleson: Predicting corresponding colors with changes in adaptation. *J. Color Res. Appl.*, **4** (1979) 143.
- 19) C. J. Bertleson: Changes in color appearance with variations in chromatic adaptation. *J. Color Res. Appl.*, **4** (1979) 119.
- 20) K. Richter: Cube-root color spaces and chromatic adaptation. *J. Color Res. Appl.*, **5** (1980) 25.
- 21) Y. Nayatani, K. Takahama and H. Sobagaki: Formulation of a nonlinear model of chromatic adaptation. *J. Color Res. Appl.*, **6** (1981) 161.
- 22) W. D. Wright: Why and how chromatic adaptation has been studied. *J. Color Res. Appl.*, **6** (1981) 147.
- 23) I. T. Pitt and L. M. Winter: Effect of surround in perceived saturation. *J. Opt. Soc. Am.*, **64** (1974) 1328.
- 24) A. N. Chalmers: A colorimetric comparison of color reproductions. *J. Color Res. Appl.*, **4** (1979) 217.
- 25) C. J. Bertleson and E. J. Breneman: Brightness reproduction in the photographic process. *J. Photogr. Sci. Eng.*, **11** (1967) 254.
- 26) C. J. Bertleson and E. J. Breneman: Brightness perception in complex fields. *J. Opt. Soc. Am.*, **57** (1967) 953.
- 27) R. W. G. Hunt, I. T. Pitt and P. C. Ward: The tone reproduction of colour photographic materials. *J. Photogr. Sci.*, **17** (1969) 198.
- 28) C. J. Bertleson: On the preferred reproduction of flesh, blue-sky, and green-grass colors. *J. Photogr. Sci. Eng.*, **6** (1962) 19.
- 29) R. W. G. Hunt, I. T. Pitt and L. M. Winter: The preferred reproduction of blue-sky, green grass and caucasian skin in colour photography. *J. Photogr. Sci.*, **22** (1974) 144.
- 30) 西村 武: カラーテレビ画像の好ましい色再現. テレビ誌, **28** (1974) 623.
- 31) 西村 武: カラー TV の色再現と色彩設計. 画像技術, 10月号 (1971) 1.
- 32) N. Ohta: The color gamut obtainable by the combination of subtractive color dyes. *J. Photogr. Sci. Eng.*, **15** (1971) 399.
- 33) N. Ohta: Optimum absorption band of subtractive dyes for color photography. *Nature*, **235** (1972) 37.
- 34) N. Ohta: Structure of the color solid obtainable by three subtractive color dyes. *Die Farbe*, **20** (1972) 115.
- 35) N. Ohta: The color gamut obtainable by the combination of subtractive color dyes. IV. Influence of some practical constraints. *J. Photogr. Sci. Eng.*, **26** (1982) 228.
- 36) N. Ohta: Evaluation of spectral sensitivities. *J. Photogr. Sci. Eng.*, **25** (1981) 101.
- 37) 竹村和彦, 大田 登, 久保走一: カラー写真に於ける分光感度の評価・カラーミスマッチの観点から. 日写誌, **46**, (1983) 23.
- 38) 大田 登: 減色法カラー写真における色再現. 光学, **3** (1974) 2.
- 39) 大田 登: 現在の測色学とそのカラー写真への応用. 日写誌, **39** (1976) 102.
- 40) H. Urabe and T. Miyakawa: A simulation system for color reproduction in subtractive color photography. Preprint of Symposium of Image Analysis Techniques, SPSE, Tucson AZ (1981) pp. 30, 34.