

**解 説****写真による色の再現と見え**

犬 井 正 男

コニカ (株) 第一開発センター 〒 191 日野市さくら町 1

(1991年8月26日受理)

**Color Reproduction and Appearance in Photography**

Masao INUI

Development Center Section No. 1, Konica Corporation,  
Sakuramachi, Hino 191**1. はじめに**

写真は、1839年に発明されてから、153年が経過した。この間に、いろいろなカラー写真方式が発明され、現在のような多層発色現像方式の製品は1935年に世に出た。この銀塩写真方式のほかに、カラーハードコピーを得るために、多くのシステムが現れつつある。カラーハードコピーの性能は、美しく、使いやすく、安定で、安い、ことが望まれている。カラー写真はこれらの性能を満足しているため、もっとも手軽に利用できるカラーハードコピーシステムとして、子供の成長記録から科学写真にまで、広く用いられている。ここでは、カラー写真による色の再現と見えの観点から解説する。

**2. 写真による色の再現****2.1 カラーネガフィルムの構造**

図1に示すように、一般的カラーネガフィルムは、青色光、緑色光、赤色光をそれぞれ記録する3層を主体とするゼラチン膜で構成されている。これら3層のゼラチン膜中には、青色光、緑色光、赤色光それぞれに感光するハロゲン銀とこれらの光のほぼ補色の色素を現像によって形成するカプラーを含んでいる。ハロゲン銀は、青色光に対する固有の感度をもっているため、緑感光層と赤感光層に青色光が入射しないように、イエローフィルター層が設けられている。全層のゼラチン膜の厚さは、約20 $\mu\text{m}$ であり、髪の毛の数分の1の厚さである。また、ハロゲン銀の大きさは1 $\mu\text{m}$ 以下である。現像前のカラーネガフィルムの断面写真を図2に示す。

**2.2 カラー写真画像の形成**

カラーネガフィルムへの露光とその後の現像によって、入射光量に応じた色素量が各層で形成される。カラーネガフィルムに光が入射してから色素像が形成される過程を図3に示す。たとえば、青色光が入射した場合、青感光層のハロゲン銀は感光し、緑感光層、赤感光層では感光しない。青感光層で感光したハロゲン銀は、発色現像過程で現像主薬によって還元され、銀となる。このとき、酸化された現像主薬は近傍のカプラーと反応(カプリング)して、イエロー色素を形成する。青色光が入射した場合、緑感光層と赤感光層では感光したハロゲン銀がないため、これらの層では色素は形成されない。漂白過程で銀は再びハロゲン銀となり、つぎの定着過程で未感光のハロゲン銀とともに溶解され、ゼラチン膜から定着液中に流出する。このように、ゼラチン膜中に銀およびハロゲン銀は存在しなくなり、色素像だけが存在する。青色光が入射した場合は、補色であるイエロー色素だけが形成される。他の入射光に対しても同様に、形成される色素像は入射した光の補色、つまりネガ像になっている。実際には、色再現を向上するためのマスクの色であるオレンジ色に加わった色になっている。

通常カラー写真プリントは、カラーネガフィルムがネガ像を記録するのと同じように、カラー印画紙によって、このネガ像のネガ像、すなわち被写体と同様の色を再現しているポジ像を得ることができる。

**2.3 カラー画像の色**

現像主薬の酸化物とカプラーの反応によって生成される色素であるイエロー、マゼンタ、シアン分光濃度の

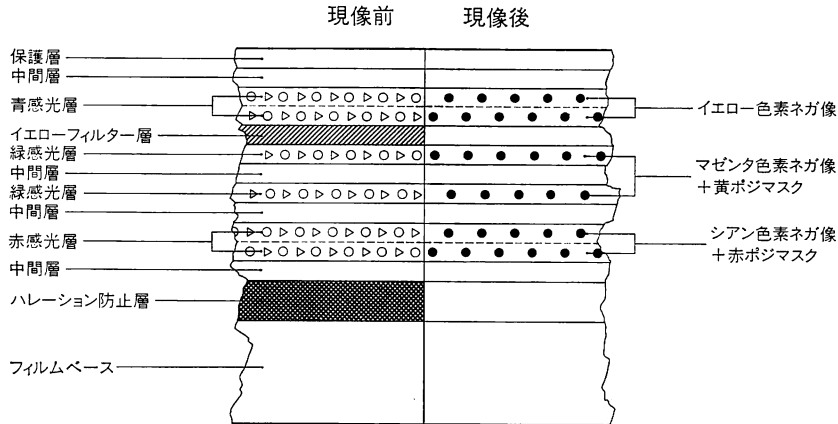


図1 カラーネガフィルムの層構成

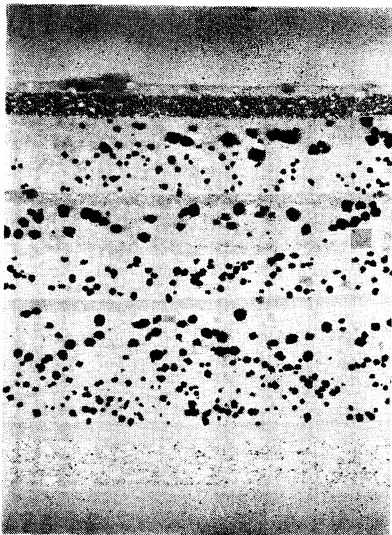


図2 現像前のカラーネガフィルムの断面写真

例を図4に示す。カラー写真画像の色は、これら3色素の量を変化させることによって再現されている。単位色素量ときのイエロー、マゼンタ、シアン分光濃度をそれぞれ  $D_{1y}(\lambda)$ ,  $D_{1m}(\lambda)$ ,  $D_{1c}(\lambda)$  とし、それぞれの色素量を  $A_y$ ,  $A_m$ ,  $A_c$  とし、ベースの分光濃度を  $D_{base}(\lambda)$  とすると、カラーリバーサルフィルムのようなカラートランスパレンシーではランバート・ベールの法則がほぼ成り立ち、その分光濃度  $D(\lambda)$  は、次式で与えられる。

$$D(\lambda) = A_y D_{1y}(\lambda) + A_m D_{1m}(\lambda) + A_c D_{1c}(\lambda) + D_{base}(\lambda) \quad (1)$$

さらに、このトランスパレンシーの分光透過率  $T(\lambda)$  は式(2)で表され、この分光透過率から、ある光源で観察したときの三刺激値  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  を求めることができる。

$$T(\lambda) = 10^{-D(\lambda)} \quad (2)$$

普通の写真プリントは反射型であり、ランバート・ベールの法則が成り立たないため、色素量と三刺激値との関係はこのように簡単には表すことができない。

図5の破線は従来のマゼンタであるが、実線は不正吸収を少なくした新しいタイプのもので、最近用いられるようになった。これらの色素をカラートランスパレンシーで用いたときに再現される色域を図6に示す。ただし、イエローとシアンは図4に示されているものとほぼ同じ色素を用いた。不正吸収部を少なくすることによって、高彩度な赤を再現できるようになった。なお、これらの色域は、筆者が開発した高速アルゴリズムを用いて計算された<sup>1)</sup>。ランバート・ベールの法則が成り立たない昇華型感熱転写方式のプリントにも、この高速アルゴリズムを適用することが可能である<sup>2)</sup>。

### 3. 色再現の向上技術

#### 3.1 カラーダコプラー

イエロー、マゼンタ、シアン色素は、それぞれ青色光、緑色光、赤色光のみを吸収することが望ましい。しかし、前述したように、実際の色素には、本来の吸収のほかに望ましくない不要吸収がある。カプラーに不要吸収と同じ色をつけたカラーダコプラーを用いることにより、色再現の向上がはかられている。カラーダコプラーを用いると、カプリングでカプラーが色素になったとき、着色した色が消え、色素本来の吸収のほかに不要吸収の色が出る。このように、カプリング前後における不要吸収部の変化がないように、すなわち、自動的にマスクング<sup>3)</sup>を行うようにカラーダコプラーが用いられている。

マゼンタのカラーダコプラーの一例を図7に示す。色素量の増加とともに、無着色のカプラーでは不要吸収部の濃度も高くなるが、カラーダコプラーを用いると色素

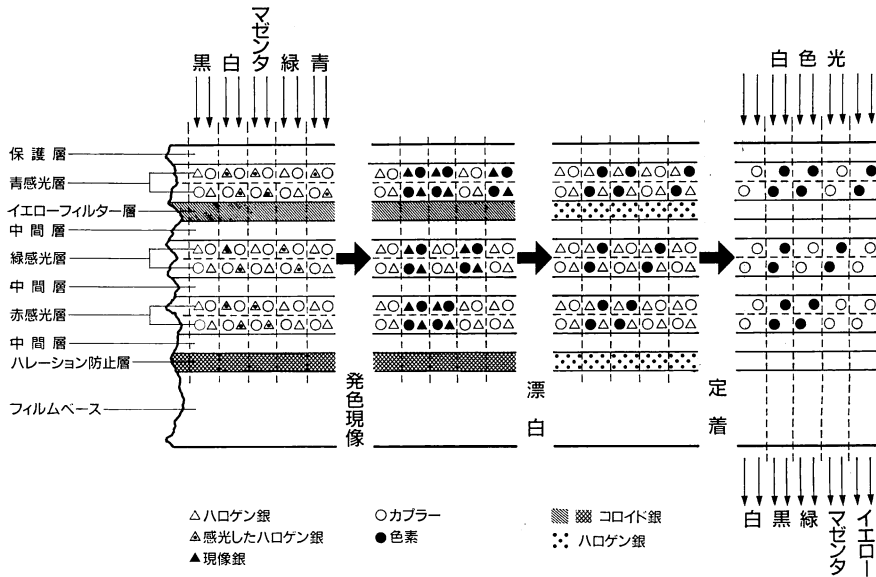


図 3 カラーネガフィルムにおける露光から色素形成の過程

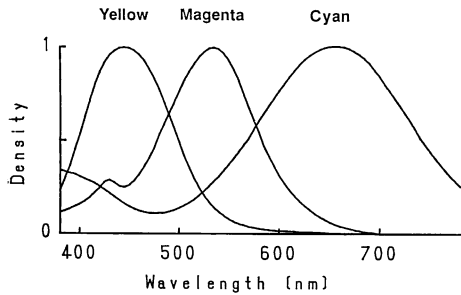


図 4 カラー写真に用いられている色素の分光濃度

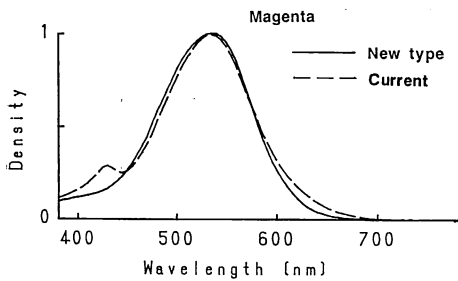


図 5 マゼンタ色素の改良  
破線は従来タイプであり、実線は新タイプの色素である。

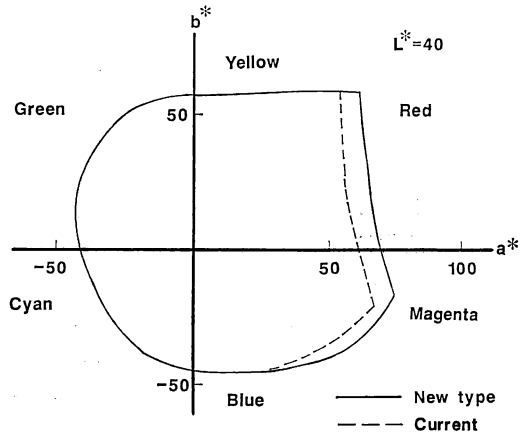


図 6 新タイプのマゼンタ色素を用いたときの色域の拡大

量に関わらず不要吸収部の濃度は一定となっている。図 1 にも示されているように、マゼンタは、その青色部における不要吸収の色であるイエローに着色されており、シアンは、その青色部と緑色部の不要吸収の色である赤に着色されている。そのため、カラーネガフィルムの未露光部は、低濃度のイエローと赤を重ねたオレンジ色を

呈している。カラードカプラーを用いると無色の部分ができないため、当然のことながら、人間が直接観察するプリントなどにはカラードカプラーを適用することができない。

3.2 DIR 化合物

カラーフィルムにおいて、ある層が一定の露光量によって感光されても、現像過程においてその上層または下層において現像主薬が多く消費されるとその層への現像主薬の拡散が少なくなり、また、上層または下層から放出される現像抑制物質の拡散が多くなり、十分な現像が行われずその層で形成される色素量が少なくなる。この現象は、各層間での現像効果でありインターイメージ

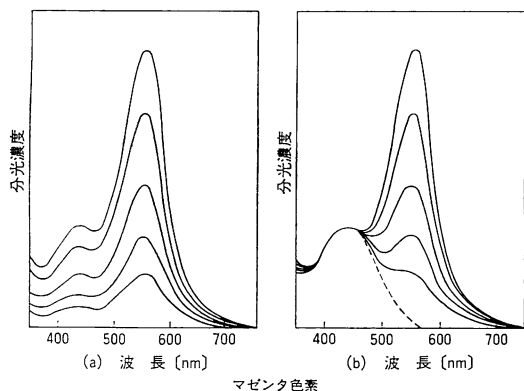


図7 色素量を変化させたときの分光濃度の変化  
a) 無着色のカプラーを用いた場合, b) カラーカプラーを用いた場合

効果とよばれている。たとえば、図4に示されているように、マゼンタ色素は青色部(400~500nm付近)に不要吸収があり、純粋のマゼンタにややイエロー色素が加わったようになってきている。インターイメージ効果により、マゼンタが発色するとイエローの発色が抑制され、マゼンタの不要吸収を削減する効果がある。このように、自動的にマスクングがなされ不要吸収部の補正が行われる。

カプリング時に現像抑制剤を遊離するカプラーなどのDIR (development inhibitor releasing, 現像抑制剤遊離の略) 化合物が、カラーフィルムで用いられている。この化合物によるインターイメージ効果が積極的に利用され、色再現性の改善が行われている。DIR化合物を用いることにより、高彩度な色はより鮮やかに再現されるようになった。また、DIR化合物の使用により、

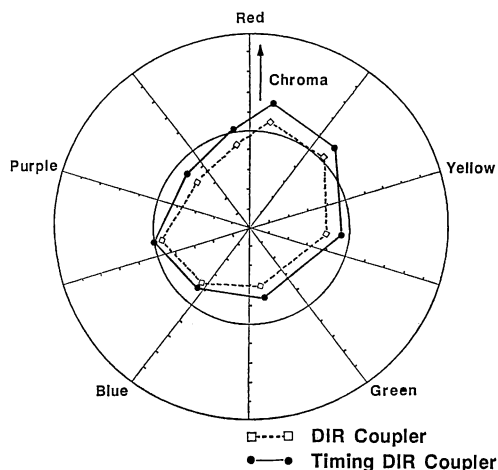


図8 タイミング DIR カプラーによる高彩度色の再現

シャープネス、粒状性も向上する<sup>4)</sup>。遊離された物質がしばらくしてから現像抑制物質をさらに遊離するタイミング DIR カプラーが、最近開発された。これを用いると、乳剤層を拡散して任意の層に達してから現像抑制効果を発揮することが自由にコントロールできる。そのため、図8に示されるように、従来の DIR カプラーより、さらに高彩度な色を再現する<sup>5)</sup>。また、シャープネスも高くなる<sup>5,6)</sup>。

#### 4. 色再現の分類と目標

カラー画像を再現するシステムに対する要求は、再現画像が観察される条件によって異なる。したがって、色再現の評価は、観察条件に対して合理的なものでなければならぬ。Hunt は、光源、照度などの観察条件と色再現の目標の違いを考慮して、色再現をつぎの6種に分類した<sup>7,8)</sup>。

##### 1) 分光の色再現 (spectral color reproduction)

オリジナル再現画像における分光反射率または分光透過率が等しい色再現をいう。オリジナルと再現画像の分光反射率をそれぞれ  $R_o(\lambda)$ ,  $R_r(\lambda)$  とすると、

$$R_o(\lambda) = R_r(\lambda)$$

のときであり、いかなる光源に対しても、オリジナルと再現画像の三刺激値は一致する。すなわち、三刺激値を表すベクトル  $T$  を、

$$T = (X, Y, Z)$$

としたとき、常に

$$T_o = T_r$$

である。ここで、

$$\begin{aligned} T_o &= (X_o, Y_o, Z_o) \\ &= \left( \int P(\lambda) R_o(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \right. \\ &\quad \left. \int P(\lambda) R_o(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \right. \\ &\quad \left. \int P(\lambda) R_o(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \right) \\ T_r &= (X_r, Y_r, Z_r) \\ &= \left( \int P(\lambda) R_r(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \right. \\ &\quad \left. \int P(\lambda) R_r(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \right. \\ &\quad \left. \int P(\lambda) R_r(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \right) \end{aligned}$$

であり、 $P(\lambda)$  はオリジナルと再現画像を観察するときの光源である。

##### 2) 測色の色再現 (colorimetric color reproduction)

オリジナルと再現画像における色の三刺激値が等しく、かつ光源の分光分布が相対的に等しい色再現をいう。この場合、光源の強度の一致は必要としない。オリジナルと再現画像を観察するときの光源の分光分布を、それぞれ  $P_o(\lambda)$ ,  $P_r(\lambda)$  とすると、

$$P_o(\lambda) = k P_r(\lambda)$$

$$T_o = T_r$$

である。ここで、 $k$  は定数である。

3) 正確な色再現 (exact color reproduction)

オリジナルと再現画像における色の三刺激値が等しく、さらに光源の分光分布が等しい色再現をいう。

$$P_o(\lambda) = P_r(\lambda)$$

$$T_o = T_r$$

視角、周辺視野などの観察条件が等しければ、オリジナルと再現画像における色の見え方は等しい。

4) 等価な色再現 (equivalent color reproduction)

オリジナルと再現画像の光源の分光分布と観察条件は異なっているが、それぞれにおける色が等価色の関係である色再現をいう。すなわち、

$$P_o(\lambda) \neq P_r(\lambda)$$

であり、再現画像を観察するときの光源でオリジナルを観察したときの三刺激値を、

$$T' = (X', Y', Z')$$

$$= \left( \int P_r(\lambda) R_o(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \right.$$

$$\int P_r(\lambda) R_o(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \left. \int P_r(\lambda) R_o(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \right)$$

とする。心理物理量である  $T_o$  と  $T'$  は異なるが、色覚恒常のためこれらの色は主観的には同じように見える。

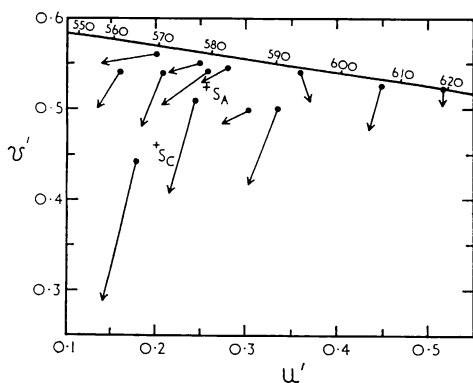


図 9 標準の光 A (点) と C (矢印) で同じ色の見えの色度

さらに、

$$T' = T_r$$

であるようなとき、オリジナルと再現画像の色の見え方は主観的に同じである。図 9 は、標準の光 A および C によって照明され、輝度が等しい場合における等価色の関係を示したものである。等価色は、オリジナルおよび再現画像における光源の分光分布および強度そして周辺視野の条件に複雑に影響される。また、必ずしもオリジナルと再現画像の輝度  $L$  が等しい必要はないが、輝度差が大きいと実現が困難である。そのため、

$$L_o = L_r$$

であることが望ましい。

5) 対応の色再現 (corresponding color reproduction)

オリジナルと再現画像の光源の分光分布と観察条件は異なっているが、それぞれにおける色が対応色の関係である色再現をいう。対応色は、異なる観察条件に順応しているとき、同じ見えとなる色の対である。対応色は順応モデルを用いて計算的に求めることができる。順応に関しては多くのモデルがあるが、Hunt は図 10 に示される関係を基に、オリジナルと再現画像の三刺激値が、

$$T_o = 100(T_r/100)^{1/g}$$

という関係となっているときを対応色とした。ただし、 $g$  はコントラストの低下を補う係数で、周辺視野の明るさに依存し、

$$g = 1.0 \text{ (for average surround),}$$

$$1.2 \text{ (for dim surround),}$$

$$1.5 \text{ (for dark surround)}$$

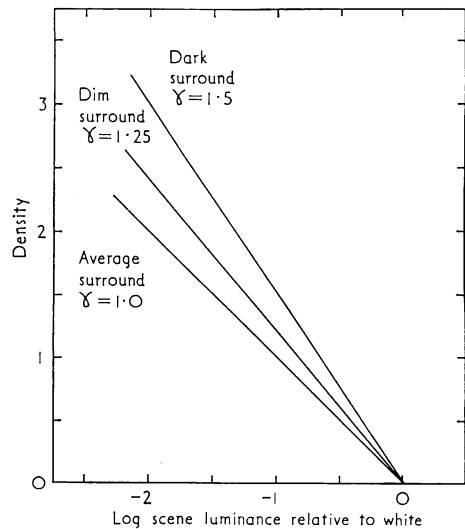


図 10 対応色再現を達成する濃度

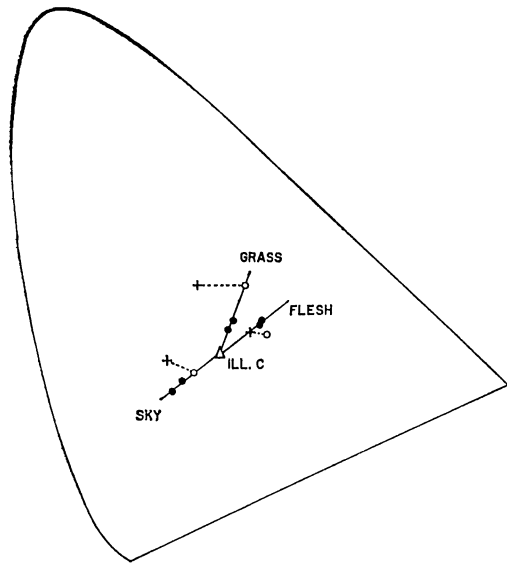


図 11 最適な再現色 (●), 自然の色 (○), 記憶色 (+)の色度

である。

6) 好ましい色再現 (preferred color reproduction)

より好まれる再現を達成するために、前述の分類から隔たって要求される色再現をいう。前述の各分類は、オリジナルと再現画像における色の心理物理的あるいは主観的な一致を目標とする色再現分類であったが、この一致は必ずしも必要ではない。なぜなら、図 11 に示されているように好ましい再現色は自然の色および記憶色とは一致しないことがよく知られているからである。

非実用的な Lippmann 方式では分光の色再現を達成することができるであろうが、現行のカラー写真システムではこれを達成することは不可能である。カラープリントの色再現の目標として測色的色再現は合理的である。さらに、テレビでの白色は標準の光 C であるため、測色的色再現はカラーテレビでの昼光シーンの再現の目標になっている。また、テレビやカラースライドに対して対応の色再現が合理的の評価規準と考えられる。肌色を一定の色相に近付ける自動肌色調整回路がアメリカのテレビで実用化されているが、これは好ましい色再現の実現である。

5. 写真による再現色の見え

対応の色再現における対応色とは、異なる観察条件に順応しているとき、同じ見えとなる色の対である。照明が変化すると物体から反射されて眼に入射する分光エネルギーも変化するが、知覚される色はそれほど変化して

いない。これは、眼が照明光に慣れるにしたがって眼の感度が調整され、物体の色を恒常的に保とうとする作用のためである。このような作用を色順応という。眼における3種の受光器の分光感度は、順応刺激の強さに反比例して一定倍だけ変化する、という von Kries 理論は、色順応のメカニズムを単純明快に説明している。しかし、これだけでは対応色を十分に予測することはできない。照明光の照度が大きくなると無彩色のコントラストが増大して見える (Stevens 効果)、順応光の輝度が低下すると彩度が低下して見える (Hunt 効果)、照明光が色光のとき、背景反射率に近い反射率の試料は無彩色に見える、それより高い反射率の試料は照明光の色相に、低い反射率の試料は照明光の補色相に見える (Helson-Judd 効果)、などの効果を考慮しなくてはならない。

色順応の非線形モデルに関する研究が行われ<sup>9)</sup>、これを基に対応色を予測する色順応式が CIE に提案された<sup>10)</sup>。CIE は従来の方法より優れているものとし、実用試験を勧告した。これに対する実地試験が行われ、その一部が解析され、報告された<sup>11,12)</sup>。CIE に提案された、色順応の変化にともなう対応色を予測する方法は、以下に示す3段階から構成されている<sup>10)</sup>。

- 第1段階：試験試料の三刺激値  $X, Y, Z$  を、基本三刺激値  $R, G, B$  に変換する。
- 第2段階：試験試料の基本三刺激値  $R, G, B$  を、対応する基準試料の基本三刺激値  $R', G', B'$  に変換する。
- 第3段階：基準試料の基本三刺激値  $R', G', B'$  を基準試料の三刺激値  $X', Y', Z'$  に変換する。

CIE 色順応式を利用するときの条件は色票を観察するときの非常に限定された単純な条件であり、複雑な一般シーンや画像の観察とは条件が異なる。しかし、少々乱暴ではあるが、この順応式を画像の観察に適用してみた。撮影時に被写体を観察するのを試験試料の観察、再現画像を観察するのを基準試料の観察、と考え、それぞれの観察条件として表 1 に示される値を用いた。写真撮影の代表光源として、センチメートルの規格で定められた  $D_{55}$  を用いた。また、プリントの観察には、ISO

表 1 CIE 色順応式から対応色を求めるときのパラメーター

	照明光	照 度 (lx)	周辺の視感 反射率
試験視野	$D_{55}$	50,000	0.2
基準視野	$D_{50}$	500	0.8

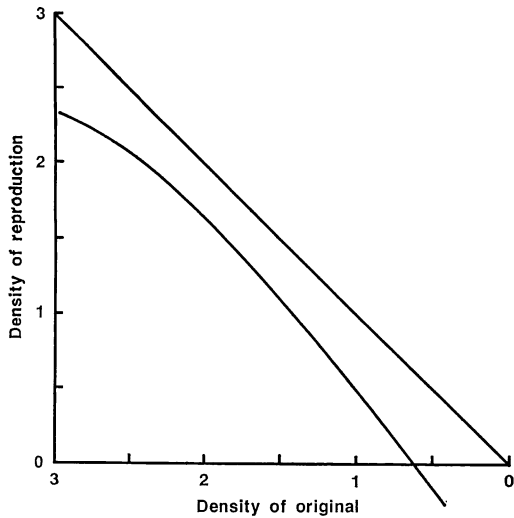


図 12 CIE 色順応式から求めた濃度の再現

で規定されている  $D_{50}$  を用いた。昼白色蛍光灯の相関色温度が約 5,500 K であるから、これでプリントを観察するときに相当する。写真撮影時に 18% の標準反射板が露出を測定するときに一般シーンの代用で用いられているので、撮影時の周辺の視感反射率をこの値に近い 0.2 とした。プリント観察時には、注目している部分の周辺に順応しているのだが、白い縁も影響しているため、表の値にした。周辺の反射率を変えると色の見えが大きく変化するため、これの合理的な決め方が問題となるであろう。

階調をみるために、白から黒にいたる中性灰色の試料の三刺激値から、それらの対応色の三刺激値を求めた。得られた対応色は、中性灰色ではないが、中性灰色に近かった。それぞれの三刺激値  $Y$  から濃度を求め、オリジナルと再現画像の濃度の関係を表したのが、図 12 である。ハイライト部を除くと、濃度が約 0.3 低く、すなわち約 2 倍の明度を必要としている。ハイライト部では、濃度 0 以下、つまり 100% 以上の反射率を必要としている。

色再現をみるため、マクベスカラーチェッカーを用い、各色票の対応色を求めた。このようにして得られた被写体と再現画像での色の関係を図 13 に示す。再現画像ではオリジナルの約 2 倍の彩度でないと同じ色には見えないことを示している。表 1 で表されるような条件のときには、高彩度あるいは高彩度の被写体の対応色をプリント上で実現することはできない。そのため、高彩度あるいは高彩度の部分での圧縮が必要となる。この圧縮が全体におよび、結局、測色の色再現と近くなり、それ

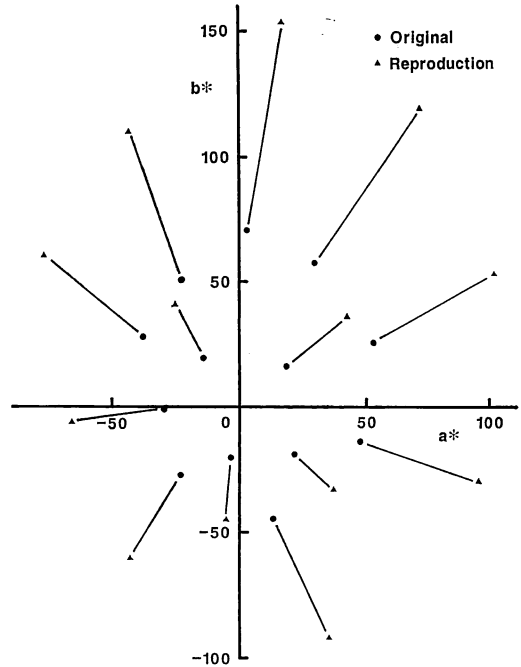


図 13 CIE 色順応式から求めた色再現

が目標となるのではないだろうか。

## 6. おわりに

CIE 色順応式の適用範囲はまだ限られており、また、実際の観測結果との隔たりがあり、今後の発展が望まれる。色順応式が改良され、複雑に入り組んだ色から構成されている画像の観察に利用できるようになると、色再現系の設計に便利となるであろう。

## 文 献

- 1) 犬井正男：日本写真学会昭和 63 年度年次大会講演要旨 (1988) p. 58.
- 2) 犬井正男，池端依子：Japan Hardcopy '90 論文集 (1990) p. 217.
- 3) 日本写真学会編：写真工学の基礎，銀塩写真編 (コロナ社，1979) p. 464.
- 4) 日本色彩学会編：新編色彩科学ハンドブック (東京大学出版会，1985) p. 878.
- 5) R. Sato: "The advancement of imaging science and technology," *Proceeding of the International Congress of Photographic Science 1990* (1990) p. 285.
- 6) 小坂橋洗夫：Konica Technical Report, 1 (1988) 5.
- 7) R. W. G. Hunt: *J. Photogr. Sci.*, 18 (1970) 205.
- 8) 久保走一：日本写真学会誌，38 (1975) 379.
- 9) K. Takahama, H. Sobagaki and Y. Nayatani: *Color Res. Appl.*, 9 (1984) 106.
- 10) CIE-Journal, 5 (1986) 16.
- 11) 森 礼於：日本色彩学会誌，14 (1990) 53.
- 12) 森 礼於，ほか：日本色彩学会誌，15 (1991) 79.