

# 特集 測色の基礎から色再現まで

## カラー写真における色再現

### Color Reproduction of Color Photography

上澤 邦明 Kuniaki Uezawa

コニカ (株)

KONICA Corp.

#### 1. はじめに

私たちの身の回りで最も身近なカラー画像として、加色法ではテレビジョン、減色法ではカラー写真が代表的なものであると言える。しかし最近ではパソコンの急速な普及に伴いその周辺機器であるプリンターの画質も進歩している。特にインクジェットプリンターの画質の進歩はここ数年めざましいものがあり、プリンターメーカーはうたい文句として「写真画質」という表現をよく使っている。

ここでは、「写真画質」と言われる中の色再現についてカラー写真の特徴、しくみ、色再現向上に用いられているさまざまな技術について述べる。

#### 2. カラー写真の色再現の特徴

カラー写真はイエロー、マゼンタ、シアンの3つの原色で色を表現しているため完全な色再現は不可能である。Hunt<sup>1)</sup>は、色再現の目標を以下の6つのカテゴリーに分類した。

- ・ 分光の色再現
- ・ 測色の色再現
- ・ 正確な色再現
- ・ 等価な色再現
- ・ 対応する色再現
- ・ 好ましい色再現

カラー写真では「測色の色再現」、つまり被写体の

色と再現色の三刺激値が同一となる色再現を目標とすることが一応合理的と考えられている。しかし、我々がカラー写真を見てその色の良し悪しを判断するのは、実際の被写体とカラー写真を直接比較するのではなく、記憶にある被写体の色とカラー写真の色を比較することが多い。そこでカラー写真は好ましい色再現も考慮し色再現設計が行われている。その代表的な色が肌色である。これは人物の肌色は撮影される被写体の中で最も多く、また重要であることによる。実際の例として、たとえば日本人の好ましい肌色は実際よりやや黄味が少なくやや赤味の方向で、肌色に赤味がつく設計を行っているカラーフィルムもある。肌色の好みに関しては人種間により差があり白人は黄色味がつく肌色を好むため<sup>2)</sup>、欧米向けポートレート用のカラーフィルムはやや黄味がつく肌色設計を行っている。実際のカラー写真の肌色再現を色度図上に示す。(図1) その他に、青空の青、草木の緑なども好ましい色再現を考慮して設計されている。

もう一つのカラー写真の色再現上の特徴は白から黒までグレーに関しては色味がつかないように設計されている。これはグレーに関しては人間は色の変化に敏感であり、特に濃度によってグレーが異なることは嫌われるためである。このためカラー写真は白から黒までのグレーの濃度による色のつながりが崩れないような設計に重点をおいている。デジタルスチルカメラや

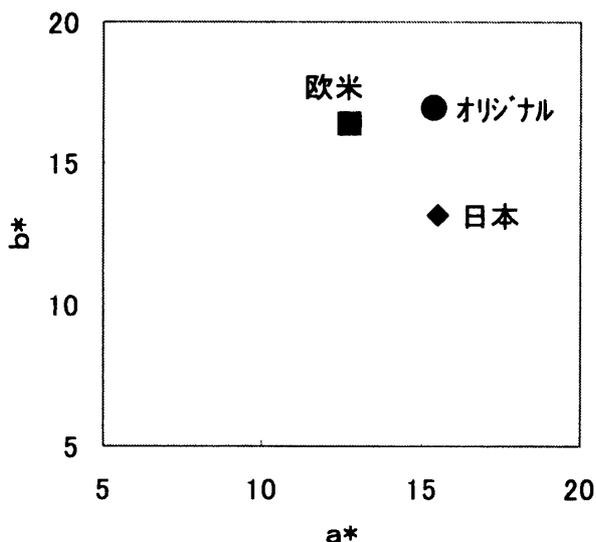


図1 日本、欧米向けフィルムでの肌色再現の差

インクジェットプリンターなどのカラーマッチング技術の進捗はめざましいものがあるが、グレーも肌色も多くの色の一つとしており、現状ではその色再現の思想はカラー写真とは異なっている。

現在、発売されているカラーネガフィルムはさまざまな感度を含め40種近くにも及ぶ。その中で特に設計思想が異なるのはISO100、400などのアマチュア用フィルムと営業写真館等で用いられるプロ用フィルムであると言える。プロ用のフィルムの階調特性はアマチュア用フィルムに比べ10～15%程度、軟調な設計となっている。プロ用フィルムは婚礼写真等に多く用いられるため、ウェディングドレス、タキシードなどハイライトからシャドーまで豊かな階調再現を行うために軟調な設計としている。この階調特性は色再現性にも影響し硬調なフィルムのほうがより鮮やかな色再現となる。プロ用フィルムは派手さよりはより忠実な色再現も望まれているため軟調な設計と、適度な色強調になっており、アマチュア用フィルムは一般アマチュアユーザーの鮮やかな色を好むという嗜好に合わせてやや硬調な階調の設計と、強い色強調にしている。このようにカラー写真は、長年カラーハードコピーの代表的な存在であったため、用途、目的に応じたユーザーの嗜好、好みに対する知見が多く、色再現設計に役立てている。

以上、まとめるとカラー写真の色再現の特徴は以下の3点であると言える。

- ・「測色的色再現」が基本であるが、肌色など重要な色に関しては「好ましい色再現」を考慮している。
- ・人間の眼の視覚特性を考慮し、グレーに関しては

ハイライトからシャドーまでつながりを重要視し設計している。

- ・用途、目的に応じユーザーの嗜好、好みに合わせた色再現設計を行ったさまざまな品種がある。

### 3. カラー写真の色再現過程

カラー写真の色再現の詳細な原理については数多くある専門書<sup>3)</sup>を参照していただくとして、ここではカラーネガフィルムで撮影しカラー印画紙へプリントした場合の色再現過程の概要について述べる。

#### 3-1 カラーフィルムの構造

撮影感材である一般的なカラーネガフィルムの層構成は図2に示されるように支持体上に青色光、緑色光、赤色光におのおの感光するハロゲン化銀乳剤を含んだ青感光性層、緑感光性層、赤感光性層の3種の感光性層があり、それぞれの層には感光する光の補色のイエロー、マゼンタ、シアンの色素を現像により形成するカプラーを含んでいる。

#### 3-2 カラー画像の形成

カラーネガフィルムは露光とその後の現像により入射光量に応じた色素が形成される。その過程を図3に示す。たとえば白色光が入射した場合、青感光性層、緑感光性層、赤感光性層のすべての層が発色する。また、緑色光が入射した場合、緑感光性層のみが感光し、現像後マゼンタ色素像を形成する。つまり、形成される色素像は入射した光の補色、ネガ像になっている。(実際には後述する色再現を向上するためのマスクの色であるオレンジ色が加わった色になっている。)通常のカラー写真プリントは、得られたネガフィルムをプリンターを介しカラー印画紙に露光しネガ像のネガ像、すなわちフィルムに露光された光と同様の色を再現しているポジ像を得ることができる。図3にポジ画像を得るまでの過程を示す。たとえば、緑色光が入射するとネガフィルムはマゼンタ発色する。そのフィルムを介しカラー印画紙に露光すると、カラー印画紙はマゼンタ光で露光され、青感光性層と赤感光性層が感光し現像により、それぞれイエロー、シアンに発色することによりフィルムに入射した光と同じ緑色の像を得る。これがカラー写真のカラー画像形成の大まかな原理である。カラーリバーサルフィルム(スライドフィルム)の構成はネガフィルムとほぼ同様であり、現像処理の際にネガ像からポジ像への変換が行われている。その詳細な過程についてはここでは省略する<sup>4)</sup>。

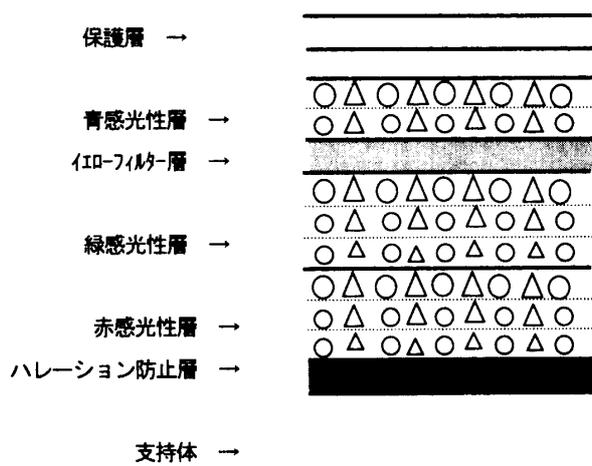


図2 カラーネガフィルムの層構成

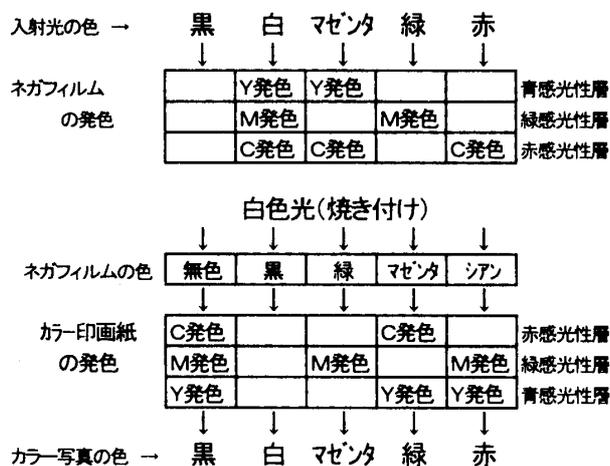


図3 カラー写真の色再現の原理

#### 4. カラー写真の色再現向上技術

カラー写真は鮮やかで忠実な色再現であることが特徴の一つであるが、そのカラー画像を作成してから推定で約100年、その色再現性を保つということも特徴であると言える。また、簡易な撮影装置（たとえばレンズ付きフィルム）で撮影しても満足のできる色再現のカラー写真が得られるなど、つねに安定した色再現のカラー写真が得られることも広い意味で色再現の特徴であると言える。これらのカラー写真の色再現性は感光材料だけの技術でなく、写真プリンターを含めたシステム全体の技術により達成している。ここではカラー写真システム（ネガポジ系）の色再現向上技術について以下を述べる。

カラーネガフィルム

- ・ カラードカプラーによるマスク技術

- ・ 重層効果

カラー印画紙

- ・ 発色色素の分光特性

- ・ 画像堅牢性

写真プリンター

- ・ 露光制御技術

#### 4-1 カラードカプラーによるマスク技術

カラーフィルムに用いられるイエロー、マゼンタ、シヤンの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が、実際の色素は本来の吸収の他に望ましくない不正吸収がある。この不正吸収を補正するのがカラードカプラーによるマスク技術である。たとえば、マゼンタ色素は緑領域に主吸収を有しているが、青領域にも不正吸収を有している。(図4) カラードマゼンタカプラーはマゼンタ色素の不正吸収の青領域を補正するためのカプラーであり、自らはイエローに着色しておりマゼンタに発色する度合いに応じてイエロー成分が少なくなるカプラーである。このカラードカプラーを適量用いることによりイエロー成分はマゼンタ発色の如何にかかわらず図5に示されるように一定に保つことができマゼンタ色素の不正吸収をカラー印画紙への焼き付け時にほぼキャンセルすることができる。同様の原理でシヤン色素の緑領域の不正吸収を補正するマゼンタ着色されたカラードシヤンカプラーも用いられている。カラーネガフィルムのベースはオレンジ色に着色しているが、これはこのカラードカプラーの色である。この色再現向上技術はカラーネガフィルムには使用できるが、ベース濃度が上がるために直接観察するリバーサルフィルムには適用できない。

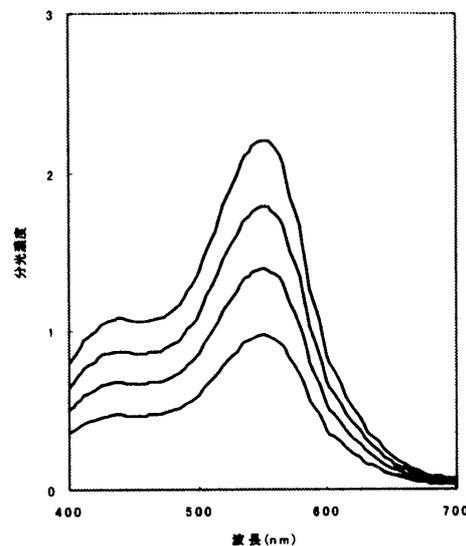


図4 マゼンタカプラーの分光吸収特性  
カラードカプラーを添加していない場合

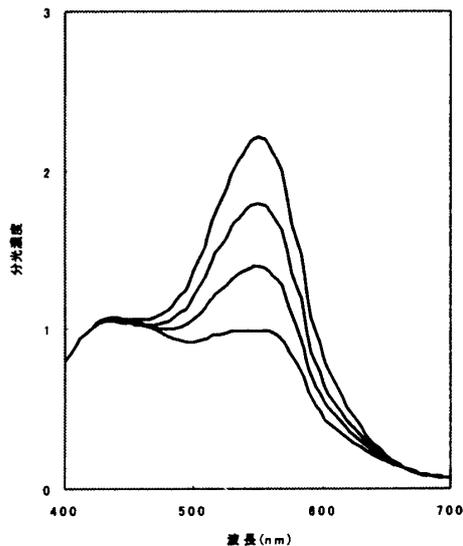


図5 マゼンタカラーの分光吸収特性  
カラードカラーを添加した場合

#### 4-2 重層効果 (インターイメージ効果)

重層効果とはカラーフィルム感光性層間の多層構成の各感光性層間の相互作用による効果を言う。カラーフィルムでは青感光性層、緑感光性層、赤感光性層の相互作用を意図的に利用し色再現の改善が行われている。この効果の一例を図6に示す。この図は赤感光性層の露光量に対する発色濃度の関係のグラフ(特性曲線)である。実線は白色光で露光した時の露光量と発色濃度の関係で破線は赤色光で露光した時のものである。この図からわかるように赤感光性層は同一の光量で露光されているにもかかわらず、白色光に対し赤色光で露光されて時の方が発色濃度が高くなっている。このように白色光よりも色光で露光された場合の発色濃度があがる効果を重層効果という。各感光性層には、その層が感光し現像されると他層の現像を抑制するDIR化合物が含まれておりこの化合物により重層効果を効かせている。この重層効果をコントロールすることにより高彩度な色はより鮮やかに再現することができる。この様にカラーフィルムは彩度強調処理を化学的に行っている。

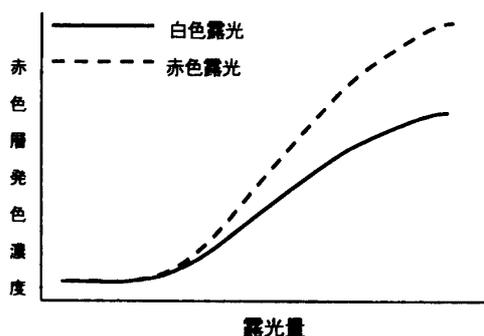


図6 カラーフィルムの重層効果

#### 4-3 カラー印画紙の発色色素分光特性の改良

カラー印画紙に用いられるマゼンタ色素はカラーフィルムと同様に以前は青領域に不正吸収を持ち色再現上、好ましくなかった。しかしマゼンタ色素化合物の改良により青領域の不正吸収が少なくなり、また長波側の吸収もシャープになった化合物が開発され色再現性、特に赤色の鮮やかさが大幅に改良された。(図7) また、イエロー色素の長波側の吸収特性も改良されより濁りの少ない黄色再現が可能となった。<sup>5)</sup>

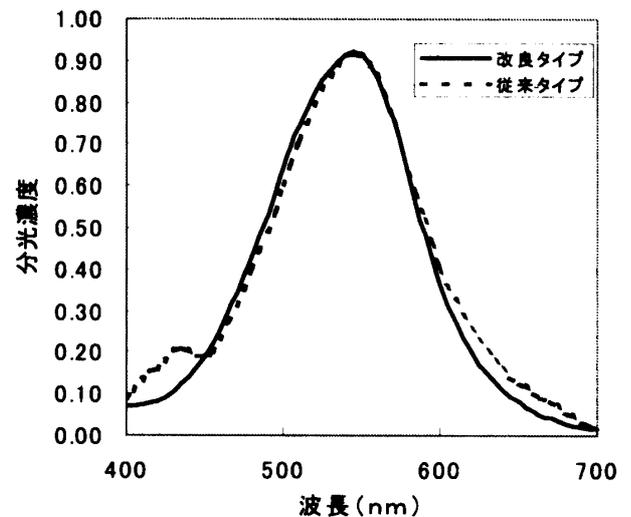


図7 カラー印画紙 マゼンタ色素の改良

#### 4-4 カラー印画紙の画像保存性

カラー写真はアルバムに保存する場合を考え、暗所での保存に対し色素が堅牢であることが望まれる。カラー写真で用いられている色素の退色はアレニウス式を用いて表現できることが知られており、高温での強制劣化テストの結果から、アレニウスの式を用いて常温での退色時間を推定すると、カラー写真は100年後でも美しい画像を保ちうるとされている<sup>6)</sup>。また、退色した場合にも各色素の堅牢性のバランスをコントロールし、色相が保たれるような技術も用いられている。このようにカラー印画紙の優れた画像保存性もカラー写真の色再現性向上技術の一つと言える。

#### 4-5 プリント作成時の色再現向上技術

カラー写真のなかで最も一般的に利用されているのは、カラーネガフィルムで撮影し、撮影済みフィルムを現像所(ミニラボ等)に出しカラープリントを得るという方法である。

現像所ではカラーネガフィルムを現像しカラー印画紙へ焼き付けプリント作成を行うが、このプリンターにも様々な色再現安定化技術が用いられている。被写体、カメラ、フィルム、現像条件などがさま

ざまであるにもかかわらず、安定した色のカラー写真に仕上がるのはこのプリンター露光制御技術によるところが大きい。

露光制御方式の基本的な概念はネガフィルムを透過する青色光、緑色光、赤色光の透過光量を一定に制御すれば、撮影露光量の過不足や、撮影光源の変動に関わらず大多数のネガから適性なプリントが得られるというものである。この中で撮影光源依存性についてはデジタルスチルカメラはオートホワイトバランス(AWB)処理により自然な色にしているが、カラー写真ではこの処理をプリンターの露光制御により行っている。最近のプリンターはカラーフィルムをスキャンし二次元的な画像情報から撮影条件をある程度推定するアルゴリズムなども組み込まれている<sup>7)</sup>。このようにカラー写真プリントの色が常に安定しているのは、プリンターの露光制御技術によるところも大きい。

## 5. 色再現向上の最近の技術動向

最近のカラー写真の色再現向上技術としてフィルムの高感度化にとともに重要な技術となってきた「蛍光灯適性向上技術」と分光感度特性をより人間の視感度に近似にするために導入された「第4の感光性層技術」、さらに、鮮やかで、かつ忠実な色再現を可能にした「重層効果、分光感度コントロール技術」について述べる。

### 5-1 蛍光灯適性向上技術

近年、主にアマチュアユーザーに使われている、ISO400やISO800などの高感度フィルムは室内で撮影されることも多い。多くの場合、室内照明は蛍光灯であり、カラー写真は蛍光灯下では緑がかってしまう。蛍光灯だけの照明であれば、前述したようにプリント時にある程度の補正は可能であるが最近のカメラはほとんどすべてのものにストロボが内蔵されており、室内などの暗いところでは自動発光する。そのため室内での撮影ではストロボと蛍光灯のミックスされた条件での撮影となる。この時、蛍光灯の影響はISO400やISO800のような高感度フィルムの方が受けやすい。最近のISO800などの高感度フィルムには蛍光灯下でも緑がからない様にするため、カラーフィルムの分光感度分布のコントロール技術が導入されている<sup>8)</sup>。蛍光灯下で撮影した場合に緑がかってしまうのはフィルムの緑感光性層の分光感度のピークと蛍光灯の輝線のピークが重なっているためである。図8に国内で最も一般的に使用されている3波長域発光型蛍光灯の分光

エネルギー分布と蛍光灯適性が向上したISO800のカラーネガフィルムの分光感度を示す。この図からわかるように蛍光灯下での色再現性を改良するために蛍光灯の443nmの輝線の影響を軽減する緑感光性層の分光感度設計をし、さらに赤味をつけるために赤感光性層の分光感度を蛍光灯の610nmの輝線に対する感度を高くする設計をしている。

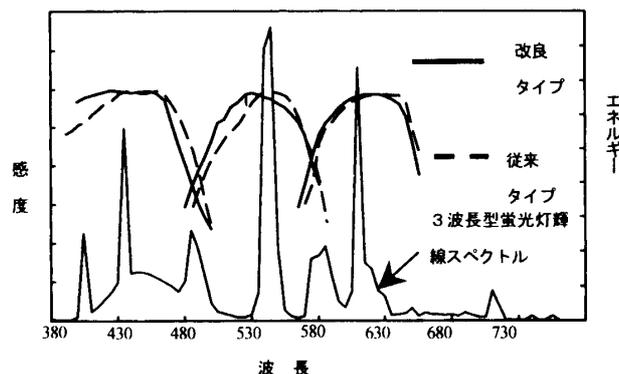


図8 分光感度分布と蛍光灯のエネルギー分布

### 5-2 第4の感光性層の導入

人間の眼の色知覚を調べる混合実験より得られた等色関数には500nm付近に赤の負の部分がある。(図9) この負の分光感度を近似的にカラーフィルムで達成する手段として第4の感光性層と呼ばれるシアン感光性層が導入されたのは、実は1989年である<sup>9)</sup>。この第4の感光性層は500nm付近に分光感度をもち、この層から赤感光性層へ重層効果を効かせることにより、定性的に等色関数のような分光感度分布をカラーネガフィルムで達成している(図10)。この層の導入により、スペクトル光に対する再現、特に580nm付近のスペクトル光の再現が可能になったとしている。

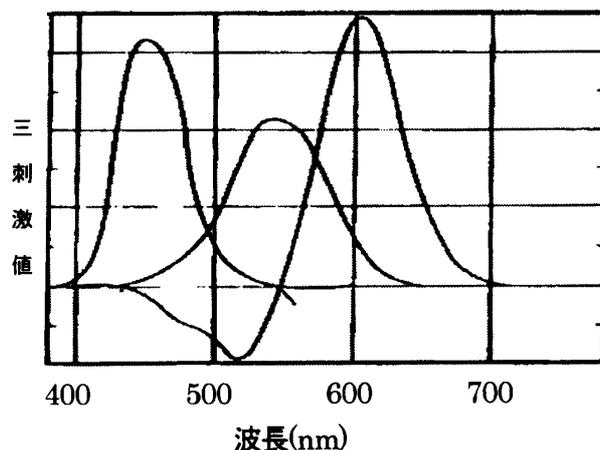


図9 RGB表色系の等色関数

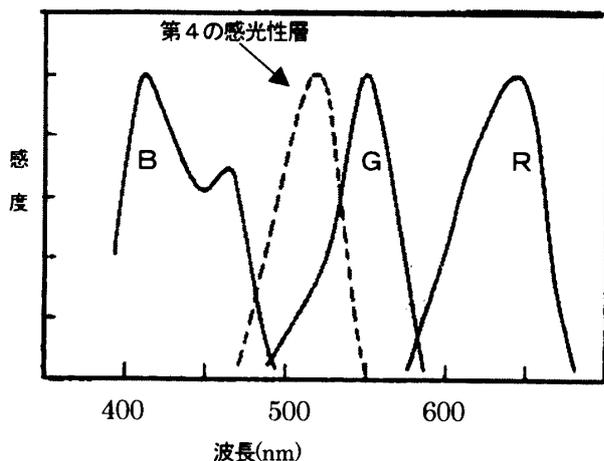


図10 第4の感光性層の分光感度

### 5-3 分光感度分布、重層効果コントロール技術

従来のカラーフィルムは鮮やかな色再現にするために、赤感光性層の分光感度はかなり長波であった。これは、カラー印画紙の色材が理想の分光特性でないため、鮮やかな色再現するために設定されていた。このため、紫などの近赤外領域を強く反射する色が赤味がかってしまうなど忠実な色相再現ができない色がいくつか存在した。しかし、現在では青感光性層、緑感光性層、赤感光性層の3層間の6種の重層効果を精密にコントロールし、分光感度分布の形状も最適化する技術が進歩したために、鮮やかであり、かつ忠実な色再現を達成することが可能になってきている<sup>10)</sup>。紫色、青緑色については、従来忠実な色再現と鮮やかな色再現の両立が困難であったが、重層効果と分光感度のコントロール技術により、色鮮やかで、かつ、紫、青緑色の忠実な再現が可能となった。紫色、青緑色について、分光感度と反射率の関係を図11に示す。

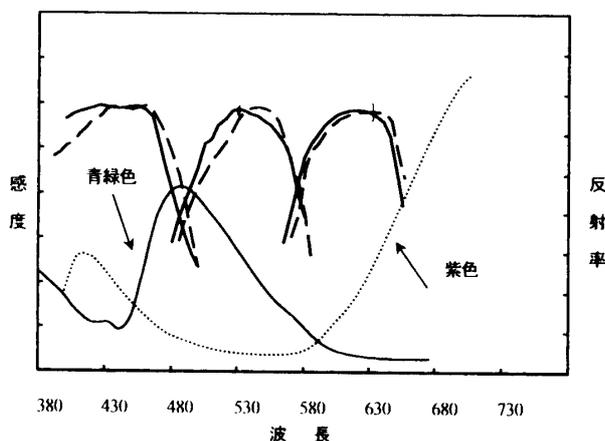


図11 色相再現の改良された分光感度分布  
実線：改良タイプ 破線：従来タイプ

## 6. おわりに

カラー写真は最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」「旅行、行事などの思い出の記録」、また最近の若い世代では、「コミュニケーションのツール」に利用されるなど、幅広く用いられている。また、人生の中の重要な行事である、「結婚式」「成人式」「七五三」では写真館等で記念写真を取ることがあたりまえとなっている。この様にカラー写真が普及した要因は今まで述べたようにカラーハードコピーに要求される性能である、画像が美しく、使い易く、いつまでも色あせることなく、安定した品質で、安価であるということを満たしているためであると言える。

また、カラー写真が発展したもう一つの要因としてシステムが全世界で共通であり、世界中のほとんどの国でカラー写真プリントを入手することが可能であるということである。

今後、色再現を含むカラー写真の高品位な品質を更に安定して提供するために、現在、写真関連企業の共同活動PFQ-NP(Photofinishing Quality of NP System)が行われている<sup>11)</sup>。このように業界が連携してカラー写真の品質向上に努めることによりハロゲン化銀カラー写真システムはさらに発展し続けるであろう。

## (参考文献)

- 1) R.W.G.Hunt : J. Photogr. Sci., 18, P205 (1970)
- 2) 鈴木恒夫、日本色彩学会誌 Vol.14 P153 (1990)
- 3) 日本写真学会編、「改訂 写真工学の基礎、銀塩写真編」、コロナ社 P580 (1998)
- 4) 文献3 P366
- 5) 梶原真、西嶋豊喜、水倉登、Konica.Tech.Rep, vol.5, P25 (1992)
- 8) 小坂橋洸夫、Konica.Tech.Rep, Vol.1 P5 (1988)
- 9) 山中義明、写真工業 11月号 P36 (1992)
- 10) 飛田啓輔、写真工業 5月号 P42 (1999)
- 11) 佐々木登、第6回色彩工学コンファレンス、P47 (1989)
- 12) 川島保彦、石川貞康、榛葉悟、Konica.Tech.Rep.vol.12, P143 (1999)
- 13) 生駒秀人、カラーラボセミナー、P25 (1999)