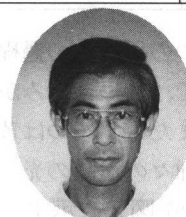


# 色の知覚

The Fundamental Properties of Colour Perception.



昭和49年3月東京工業大学物理情報工学専攻修士課程修了。同年松下電器産業㈱に入社、視覚技術の開発に従事。現在、松下電子工業㈱照明事業本部技術センターで光源ソフト技術の開発に従事。工学博士。

専門会員 武内 徹二  
Tetsuji Takeuchi

◀キーワード：色覚、色弁別力、色順応、演色性、高齢者

## 1. はじめに

私たちの身の回りには花や草木などの自然物の色やディスプレイ表示の色など様々な色彩のものがある。これらは私たちに危険や安全などのさまざまな情報を与えたり、また、色彩豊かな環境を提供するなど、安全かつ快適な日常生活を送るための重要な役割を果たしている。ここでは、まず、色を感じる人間の視覚の仕組みを紹介し、次に色の知覚に関するいくつかの特性を紹介する。

## 2. 色を知覚する仕組み

色を知覚する仕組みは2つの段階から成り立っている。第一段階は、網膜にある数種類の視細胞が光の波長に対してそれぞれ特徴的な反応をすることである。第2段階は視細胞からの信号が視神経などに伝達・処理されて色を知覚する段階である。

網膜には光に反応するすい体とかん体の2種類の細胞

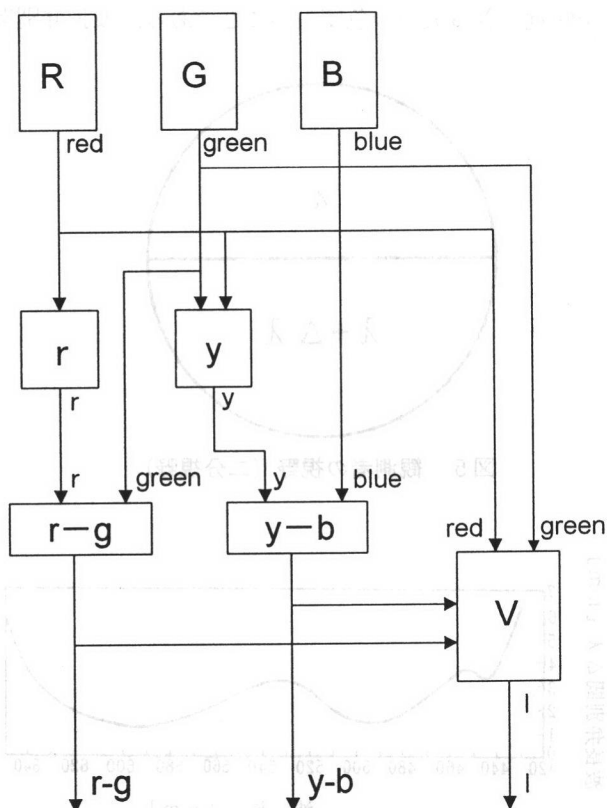


図1 色覚の仕組み

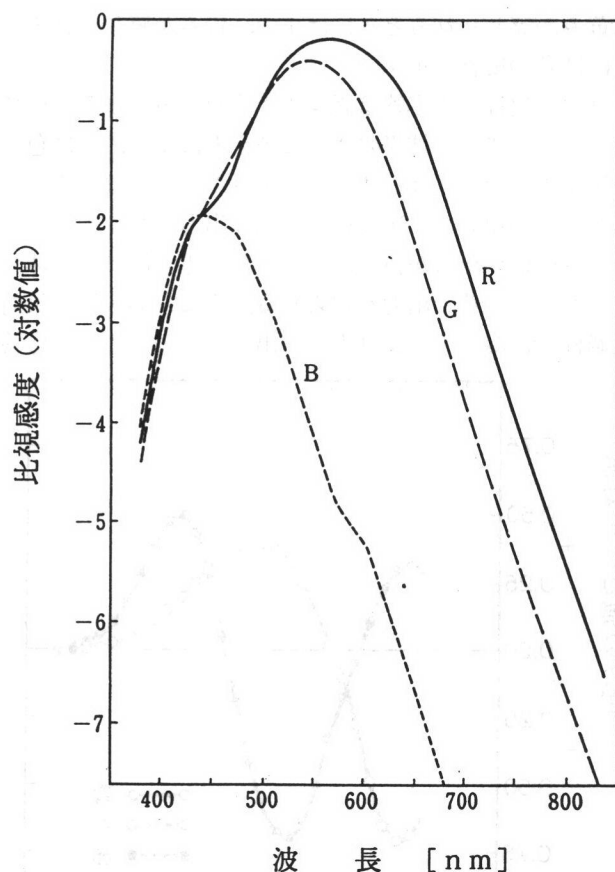


図2 すい体の分光感度特性

がある。このうち、図1のように、すい体が反応して得られた信号をもとに色を知覚する<sup>1)</sup>。すい体には青すい体、緑すい体、赤すい体と呼ばれる3種類のすい体があり、それぞれ図2のように短波長領域、中波長領域、長波長領域に感度のピークをもつ<sup>2)</sup>。これは、たとえば3管式のカラーテレビカメラの3種類の撮像管に相当する。3種類のすい体からはそれぞれ赤と緑と青に対応する信号  $r$ ,  $g$ ,  $b$  が得られる。ここまでの第1段階と考えられる。

次に赤すい体と緑すい体の出力が合成されて黄色の信号  $y$  が得られる。次に、赤、緑、黄、青の4つの信号が、それぞれ赤—緑と黄—青の2対の反対色過程 (図1の  $r-g$  と  $y-b$ ) に送られる。反対色とは、互いに共存しない色の対のことであり、例えば黄緑色は黄色と緑色の混ざった色に感じられるが、赤緑のような赤と緑が混ざった色を感じることはない。後者のような同時に感じられることのない色の組み合わせが反対色で、視覚には赤と

緑、黄と青の2つの反対色の過程があると考えられている。反対色過程で、一つは赤みか緑みのどちらが強い(感じられる)、またもう一つは黄みと青みのどちらが強いかが決まる。種々の波長の光に対する2つの反対色過程での応答特性<sup>3)</sup>を図3に示す。赤—緑の反対色過程では赤みが感じられるときには正の、緑みが感じられるときには負の応答を示す。同様に、黄—青の反対色過程では黄みが感じられるときには正の、青みが感じられるときには負の応答を示す。

反対色過程での応答は図4のような、直交する座標でのベクトルの和の結果のような考え方により、なに色かが決まる。たとえば、オレンジを見たときには、赤すい体から強い出力が、次に緑すい体の出力が強く、青すい体からは弱い出力が得られる。また、赤と緑のすい体の出力から強い黄の出力が得られる。次に、赤—緑の反対色過程では緑の出力よりも赤の出力が強いので正の応答

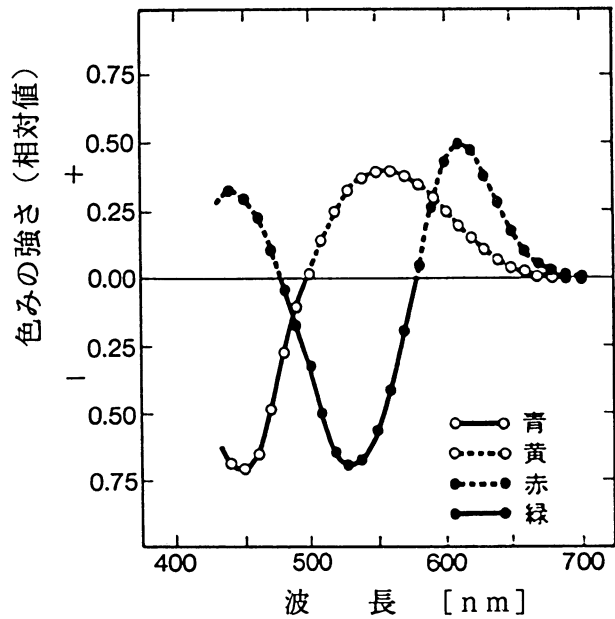


図3 反対色過程での反応特性

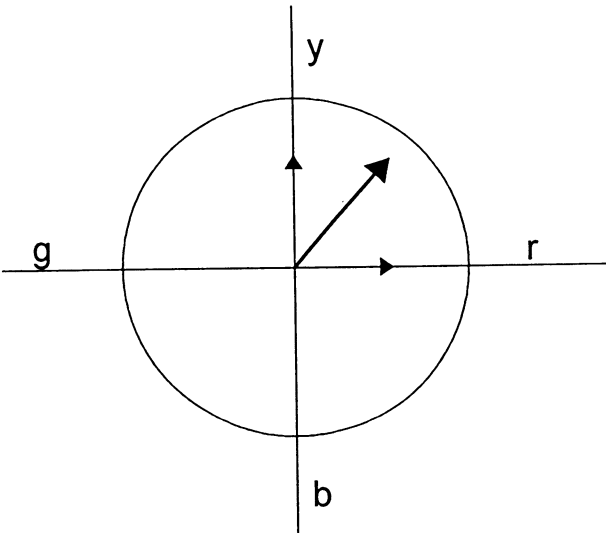


図4 色の認識の概念図

を示し、黄—青の反対色過程では黄の出力が強いので正の応答を示す。次にこれらの応答を図4の座標の軸の値として考え、赤みのある黄色、つまりオレンジ色と知覚する。

私たちは以上のような視覚のプロセスを通じて、光の色や物の色を知覚している。

### 3. 色覚に関する諸特性

#### 3.1 色の弁別

明るさの弁別の限界を表す閾値として輝度差弁別閾や輝度対比弁別閾があるように、色の弁別には波長弁別閾と色度弁別閾、純度弁別閾がある。

波長弁別閾は、ある単波長光に対してそれと色の違いを感じられる最小の波長差のことである。例えば、図5のような2つの半円を組み合わせた視野を観測者を見せて、上下の半円の明るさを等しく保ちながら一方の半円の波長を変化させ、色の違いが感じられる最小の波長差を求める。この最小の波長差( $\lambda$ )を種々の単波長光に対して求めたのが図6に示す波長弁別閾<sup>4)</sup>である。

波長弁別閾の特性は、視野の大きさや明るさのレベルによって変化し、一般に視野の大きさが大きいほど、また明るいほど閾値は小さくなる。ただし、約490nmと600nm付近で閾値が最も小さくなるという定性的な特性は視野の大きさや明るさの条件が変化しても同様の特性となる。

色度弁別閾は、色度座標上の様々な色に対して、色の差を知覚できる最小の色度差のことである。波長弁別閾

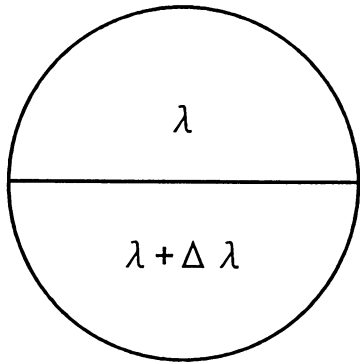


図5 観測者の視野 (二分視野)

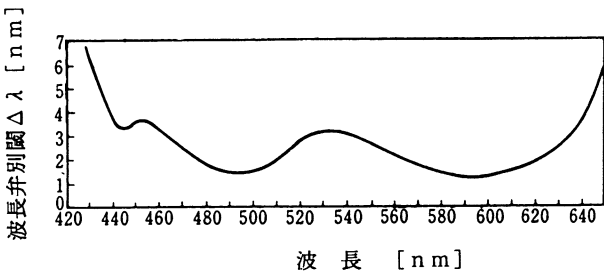


図6 波長弁別閾の特性

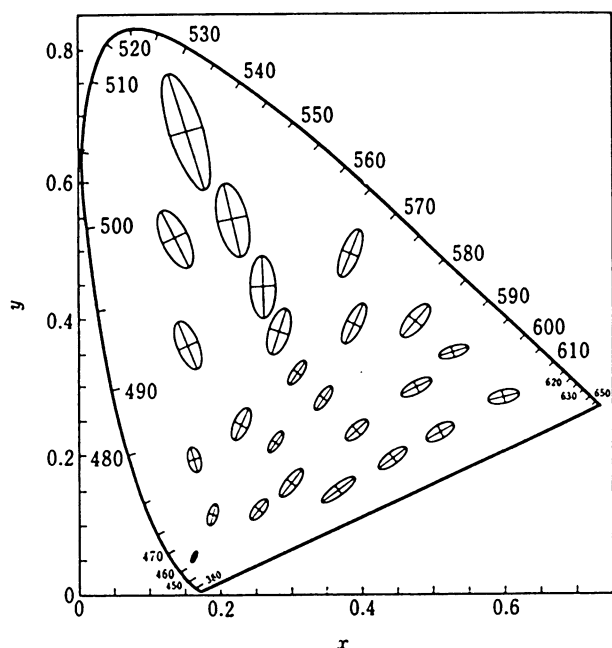


図7 色度弁別閾の特性

と同様に、たとえば2つの半円の視野のうち、一方の半円の光の色度を一定にし、他方の色度をわずかに変化させて色の違いを感じられる限界の色度を求める。このような実験の結果<sup>5)</sup>は図7に示す MacAdam の楕円として知られている。MacAdam の楕円では、2つの視野の色合わせの実験結果から求めた標準偏差を楕円で表しており、図7では標準偏差の10倍の値を用いて楕円を描いている。色度弁別閾は、標準偏差が示す色度差の約3倍の値と考えられている。図に示すように、一般に色度弁別閾は青や赤の領域では小さく緑や黄の領域では大きくなる。

白色光に、ある波長の単波長光を少しずつ加えていくと徐々に色みが強く感じられる。この色みの強さが純度である。純度差弁別閾とは、たとえば2つの半円の視野の一方を白色光とし、他方の半円に単波長の光を加えたときに色の違いを感じられる最小の純度の差をいう。純度差弁別閾は約570nmの光に対してもっとも大きく、短波長領域や長波長領域の光に対して小さくなる<sup>6)</sup>。すなわち、黄色の光に対しては純度差がわかりにくく、多少白色が混ざっても色の違いを感じにくい。これに対して、赤や青の光に対しては少し白色が混ざっただけで色の違いが感じられることになる。

### 3.2 色順応

明るさの知覚で周囲の環境や見ている物の明るさに応じて目の感度の変化があるように、色の知覚でも照明光やそのものの色に応じて色に対する目の感度が変化する。これが色順応である。すなわち、色順応とは、目が順応している光の波長成分に応じて色感覚の感度特性が変化することである。たとえば、色温度が様々な光源で

照明された白色の物体は、その物体から反射された光の分光分布は異なるが、その照明下に十分順応したときには白い物体と感じる。これは色順応の働きによる。

色順応のしくみは2つの段階から成ると考えられている<sup>7)</sup>。第1段階は、すい体の感度変化である。

色を感じるためには、3種類のすい体の信号が必要であるが、たとえば、赤い光に順応している場合には、赤すい体の感度が、他の緑すい体や青すい体の感度と比較して、相対的に低下する。この感度の相対的な変化によって、照明光の分光分布が変化しても白い物体は白く感じられる。このような各すい体の感度変化によって色順応を説明しようとしたのがフォンクリースの理論<sup>8)</sup>である。

しかし、すい体の感度変化だけでは、様々な色順応条件での色の見え方を説明できないことが多くの実験データから示唆されている。これに関しては、すい体の感度変化に加え、視神経の特性を考慮した色順応の理論が検討されて、さらに、様々な色順応の条件下での色の見えを求める定量的モデルが明らかにされている<sup>9)</sup>。さらにこれらのモデルをもとに、色順応を定量的に扱うための関数式(色順応方程式と呼ぶ)が明らかにされている。

これらによって、様々な色の見えの現象を予測したり、様々な照明光のもとでの色の見えを予測することが可能になった。

### 3.3 高齢者の色覚

年齢の増加にともなう色覚特性の変化については近年、様々な研究が進められている。このなかで加齢にともなう水晶体の黄色化が一因となって、色識別力が低下することがある<sup>10)</sup>。水晶体の黄色化により、図8のように短波長領域の光に対する透過率が、若年齢者に比べて低下する<sup>11)</sup>ため、特に青や紫の領域の色の弁別が低下することである。

いっぽう、老人性白内障の手術を受けた人たちが、水晶体を摘出した直後に、様々な色彩を見て、特に青色領域の色彩に対して、鮮やかに感じる印象を聞くことがある。これらのことから、若年齢者に黄色の色フィルタを通して色彩を見せ、その時の色の見え方をあたかも高齢者の色の見え方のように短絡的に考える場合があるが、これは間違いである。黄色のフィルタを通して見ることは、単に水晶体の透過特性をまねただけで、これだけで高齢者の色の見え方を若年齢者が体験できるものではない。

水晶体の黄色化は黄色のフィルタをかけるように、短期間で起こる現象ではなく、長い期間をかけて徐々に黄色化していく。人間はその間、様々な色彩を見て、一種の色順応のような、色感覚の補正を長い期間をかけて徐々に行い、それぞれの色が的確に知覚できるように変化していると考えられる。したがって、詳細な色の識別

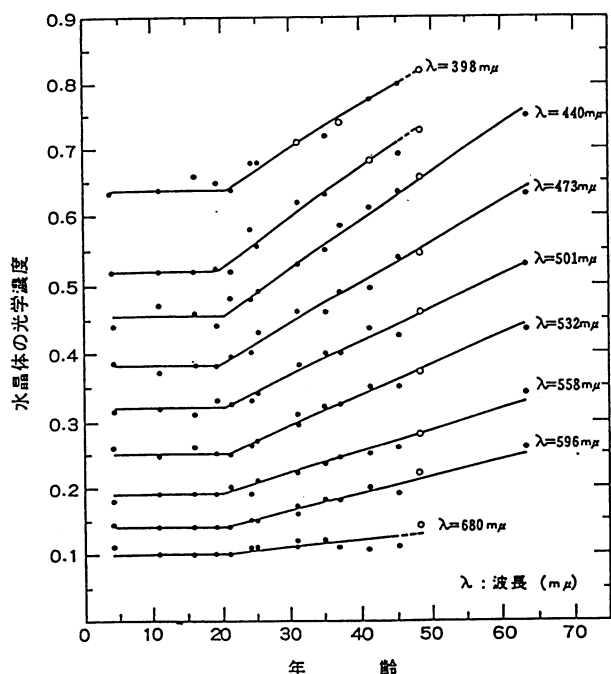


図8 水晶体の透過率特性一年齢による変化—  
透過率  $\tau$  は  
 $\tau = 10^{-D}$   
 $D$ : 光学濃度

は透過率の低下のために困難になる場合はあるが、色フィルタをかけたときのような極端な色感覚の変化は生じていないと考えるべきである。

高齢者の色覚特性については今後も研究が進展すると期待できるので、特性を正しく理解して、高齢者の特性にあった光環境を実現する必要がある。

### 3.4 色覚異常

色覚が正常な人の場合には、様々な色光と同じ色に感じられる光を作るためには赤、緑、青などの3つの独立した光を混色することが必要である。これに対して、一つまたは2つの独立した光を混色して様々な色光と同じ色に知覚する人、あるいは3つの独立した光を混色する必要があるが、それらの混色の比率が正常者のそれと異なる人がある。このような色覚特性を持つ場合をそれぞれ一色型、二色型、三色型色覚異常と呼ぶ。また、赤、緑、青のすい体が欠落、あるいはそれらの感度が正常者に比べて低下している場合を、それぞれ第一、第二、第三色覚異常と呼ぶ。これらを組み合わせて三色型第一異常、二色型第二異常などと分類している。

あるすい体が欠落していたり、感度が低下している場合には、そのすい体からの信号がなかったり、弱いので、色覚異常者の場合には色覚正常者が識別できる色の差異を識別できないことがある。たとえば、二色型第一異常の人の場合には、赤すい体の欠落によって赤の感度と赤と緑の反対色過程がないため、赤と緑の感覚が失われ、

またそれらの識別が困難になると考えられている。

色覚異常には病気や事故などが原因となった後天的な異常もあるが、遺伝による先天的な色覚異常の人が数%いると言われている。これらの人は日常生活のなかで、時としては色の識別が困難のために余分な苦勞を強いられることが考えられる。このような問題の解決策の一つとして、たとえば道路交通信号灯の色では、第一色覚異常者でも赤と青との識別が可能な色の選択がなされている<sup>12)</sup>。

信号灯や各種の表示のように、一般の多くの人に色を利用して情報を伝達する場合には色覚異常者の特性に配慮することが重要と考える。

### 3.5 カテゴリカル色知覚

色順応理論や色順応方程式を用いて様々な照明光のもとでの色の見えを求めることが可能である。この場合の色の見えとしては、たとえば基準とする照明光（たとえばA光源やD<sub>65</sub>）のもとでの色と同じ色に感じられる色票の三刺激値のような正確な見えといえる。

いっぽう、色の見えの感覚を表現する方法の一つとして、赤や青、緑など色の名前（色名）がある。この色名には、さまざまな言語に共通する基本的な色名として、白、黒、赤、緑、黄、青、茶、ピンク、橙、紫、灰の11色があると言われている。さらに、このなかで白、黒、赤、緑、黄、青の6色は主要な色である。特に赤、黄、緑、青はユニーク色と呼ばれ、他の色をこれらのユニーク色の色名を組み合わせ、たとえば黄緑や青緑のように表現することがしばしばある。これらの主要な色や基本的な色は各種の標識や信号、鉄道の路線の表示など、

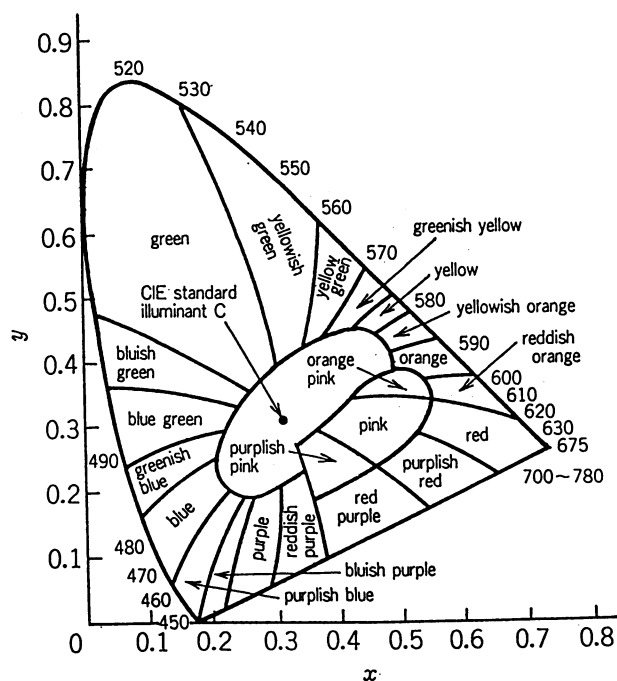


図9 光源色に対する色度座標と色名（英語名）

色によって物を識別したり、区別するための手段として日常多用されている。これらの色の知覚では、たとえば赤の表示が多少くすんだ赤に見えたり、黄色みがかった赤に見えても、赤と認識できれば表示の役割を果たすことができる。

このようなカテゴリカルな色の知覚に関する特性としては、図9のように色度座標上の様々な光に対して、これらの色名を示したものがある<sup>13)</sup>。また、単波長光の色の感覚の特性を赤、黄、緑、青の4色のうちの1色または2色の組み合わせで表したものが報告されている<sup>14)</sup>。また、種々の色の物体をさまざまな光色の照明光で照明した場合のカテゴリカルな色の見えの変化が明らかにされている<sup>15)</sup>。

#### 4. 照明への応用

色の知覚に関する特性は照明の様々な場で活用されている。ここでは、前述の色順応や色順応方程式を活用した例として、ランプの特性評価や照明設計での光源の選択のための重要な特性である光源の演色性の評価について、その概要を紹介する。

演色性は照明された物体の色の見え方に影響を与えるものであり、光源の色再現の特性を表す。この特性としては、色再現の忠実性と好ましさの2つがあるが、現在、一般にランプ評価や選択に用いられる演色性は、前者の忠実性である。

現在の演色性評価には、JIS Z8726で定められている光源の演色性評価方法が用いられている。この方法は国際照明委員会が出版した光源の演色性測定表示方法<sup>16)</sup>に基づいて制定された。

JISの方法は、15種類の色票(試験色と呼ぶ)のそれぞれを、演色性を評価しようとする光源(試料光源)によって照明したときの色の見えと、同じ色票を基準の光で照明したときの色の見えの差異の程度をもとに、演色性を数量的に表すものである。基準の光には、試料光源の相関色温度と等しい値の色温度の黒体、またはCIEが定めた合成昼光が用いられる。一般に相関色温度が5000K未満の場合は黒体が、5000K以上の場合はCIE合成昼光が基準の光として用いられる。15種類の試験色のうち、8種類は平均演色評価数用試験色と呼ばれ、中程度の彩度を有し、平均演色評価数Raの計算に用いられる。その他の7種類の試験色は特殊演色評価数用試験色と呼ばれ、赤、黄、緑、青、西洋人の膚色、木の葉、日本人の膚色のそれぞれを代表する色であり、特殊演色評価数の計算に用いられる。

試料光源と基準の光のそれぞれで照明したときの各試験色の色度座標をCIE1964U\*V\*W\*表色系で求め、試料光源で照明したときと、基準の光で照明したときの色差を計算し、これをもとに試料光源の演色評価数が求め

られる(求め方の詳細についてはJIS Z8726を参照)。この色差の計算の際に、フォンクリースの理論に基づく色順応を考慮した演算が行われている。色差が小さいほど演色評価数は大きくなり、色差がゼロのときに演色評価数は100となる。

光源の特性の一つとしてカタログなどに示されている平均演色評価数Raとは、8種類の平均演色評価数用試験色に対する演色評価数の平均値である。白熱電球のように基準の光とほぼ等しい分光分布をもち、各試験色に対する色差がゼロの光源の平均演色評価数は100となる。すなわち、平均演色評価数の大きい光源は、黒体や合成昼光といった基準の光によって照明したときとほぼ等しい色の見えを再現する、つまり忠実な色の実現するといえる。これに対して、演色評価数が低い光源は、基準の光で照明したときに比べて、各試験色の見えがずれるといえる。このように、現在一般に用いられている光源の演色性評価は、基準の光で照明したときの色の見えに比べてどの程度忠実に色を再現するかを評価するものである。

ただし、演色評価数を用いて光源の色の見えの特性を評価する場合に注意すべきことが2つあるといわれている<sup>17)</sup>。一つは演色評価数は色差、つまり色ずれの大小を反映しているが、色ずれの方向は反映していないことである。たとえば、平均演色評価数の値が60という2つの光源があるとする。一方の光源は、基準の光に比べて色を鮮やかな方向にずらすために、平均演色評価数が60となり、もう一方の光源は色をくすんだ方向にずらすために60となるとする。この場合、2つの光源の平均演色評価数は等しいが、それらによって照明されたときの色の見えはまったく異なる意味をもつことになる。

もう一つは相関色温度が異なる光源に対して平均演色評価数の大小で色の見えを比較しても、基準とする光がそれぞれ異なるので、あまり意味がないことである。

現在の演色評価数の計算に用いられている色順応の理論は、色順応による色の見えの変化を正確に評価したり、予測することはできないことが知られている。これに関しては色順応の研究が進められ、非線形理論のような、より正確かつ汎用性の高い理論が明らかになってきている。このため、CIEでは新しい色順応理論を応用した演色評価方法を提案するための活動を進めている。CIEから新提案が行われると、JISはそれに対応した評価方法の改訂が進められると考えられるので、近い将来、より正確かつ有用な評価方法が制定されると期待される。

#### 5. おわりに

色の知覚については視覚心理学や生理学の分野で様々な研究が進められ、多くの興味ある現象や特性が明らかにされている。また、色彩学や色彩技術の分野では、色

の表示方法や、見えについての基礎から応用に至る多岐にわたる研究と技術開発が進められている。また、照明技術の分野では、それらの研究を展開し、従来の演色性評価方法だけでなく、色を鮮やかに見せたり、あるいは好ましく見せる特性を評価する方法などが研究されている。本稿では、これらの中から色の知覚に関する代表的な特性を紹介した。

いっぽう近年、私たちの周囲を見渡すと益々カラフルな色彩豊かな環境が実現されている。公告には色鮮やかな各種のディスプレイが用いられたり、また住宅やオフィスなどでは、カラーコーディネートが盛んである。このように日常生活のなかで、色は重要な情報を与えたり、生活を豊かにするための不可欠なものとなっている。色の知覚の特性を理解・活用し、安全かつ快適な照明環境が実現されることを期待したい。

#### 参考文献

- (1) 池田光男 色彩工学の基礎 (1980) 朝倉書店
- (2) Vos J. J. : Colorimetric and photometric properties of 2° fundamental observer. Color Res. Appl. Vol. 3 pp.125 (1978)
- (3) Jameson D., Hurvich L. M. : Some quantitative aspects of opponent-colors theory. I. Chromatic responses and spectral saturation. J. Opt. Soc. Am. Vol.45pp. 546 (1955)
- (4) Wright W. D., Pitt F. H. G. : Hue-discrimination in normal colour vision. Proc.Phys. Soc. Lond. Vol.46 pp.459 (1934)
- (5) MacAdam D. L. : Visual sensitivities to color differences in daylight. J. Opt. Soc. Am. Vol.32 pp.247 (1942)
- (6) Wright W. D. : Researches on normal and defective colour vision. Kimpton, London, England (1946)
- (7) Hurvich L. M., Jameson D. : Further development of a quantified opponent-colours theory. In visual problem of colour. Vol. 2 London, H. M. Stationery Office pp.691 (1958)
- (8) von Kries J. : Die Gesichtsempfindungen. Handbuch von Physiologische menscheng. Vol. 3 Braunschweig : Vieweg pp. 109 (1905)
- (9) Nayatani Y., Takahama K., Sobagaki H. : Formulation of a nonlinear model of chromatic adaptation. Color Res. Appl. Vol. 6 pp.161 (1981)
- (10) Verriest G., van Laethem J., Urijls A. : A new assessment of the normal ranges of the Farnsworth-Munsell100Hue Test scores. Am. J. Ophthalmology, No.93 pp.635 (1982)
- (11) Said F. S., Weale R. A. : The variation with age of the spectral transmissivity of the living human crystalline lens. Gerontologia Vol. 3 pp.213 (1959)
- (12) CIE : Light signals for road traffic control. CIE Publ. No. 48 (1980)
- (13) Kelly K. L. : J. Opt.Soc. Am.Vol.33 pp.627 (1943)
- (14) Boynton R. M., Gordon J. : Bezold-Brucke hue shift measured by color-naming technique. J. Opt. Soc. Am.Vol.55 pp. 78 (1965)
- (15) 内川 : 異なった照明光源下でのカテゴリカル色知覚に関する研究照明学会誌 Vol.80 pp.557 (1996)
- (16) CIE : Method of measuring and specifying colour rendering of light sources. CIE Publ. No.13 (1965)
- (17) 照明学会編 : ライティングハンドブック pp.66 (1987)