表 色 系

千葉大学 工学部 日 置 隆 一

1. 色 の 定 義

色は、外部刺激—光—によって生ずる大脳中枢における応答であって、視知覚のひとつの属性と考えられる。

一般に、“色”ということばは、比較的ルーズに用いられている。しかし、“色”ということばは、心理的概念に基づいて用いる場合と、心理物理的概念に基づいて用いる場合とがある。一般には、いずれも一括して“色”として用いられている。

そこで、まずこれらを厳密に区別しておこう。心理的概念に基づいた色を、知覚色 (perceived color) といい、心理物理的概念に基づいた色を、心理物理色 (psycho-physical color) という。たとえば、物体の表面とか、カラーテレビの受像管の面などを、直接に見て色を評価する場合の色は、知覚色であり、また、物体の表面からの反射光、カラーテレビの受像管の面から発する光などを、適当な光学系を通して、限定した視野内の光を見て色を評価する場合の色は、すなわち心理物理色である。心理物理色は、やさしくいえば光の色 (color of light) である。これを開口色 (aperture color) ともいう。

知覚色をつぎのように定義することができる。：光の分光組成の差異によって、性質の差異が認知される視知覚の様相 (aspect)。また、心理物理色をつぎのように定義することができる。：光の分光組成の差異によって性質の差異が認知される可視放射エネルギーの特性 (characteristics)。

したがって、知覚色は何らかの方法によって表示することはできるが、直接に測定することができない。これに反して心理物理色は、可視放射エネルギーの特性であるから、物理的手法によって測定することはいうまでもない。また、これを心理物理的手法によって評価し、表示することができる。

知覚色は、明度とクロマティックネスとによって表示

され、心理物理色は、三刺激値 Y と色度 (x, y) とによって表示される。

2. 色(心理物理色)の表示の基礎

2.1 序

光の物理的性質と視知覚のひとつの属性としての色知覚との関連について述べよう。光を見る場合の周辺条件、また環境条件によって、色知覚 (color perception) は異なってくる。そこで、周辺条件を最も単純化した場合、すなわち前章で述べたように、限定した視野内の光を見る場合の色知覚を、一般の場合と区別して、これを色感覚 (color sensation) と呼ぶことにする。われわれの経験では、特定の観察条件のもとでは、光の物理的性質と色感覚との間に対応性のあることがわかっている。したがって、色感覚としての色 (心理物理色) は、光の物理的性質に従って、これを適当に評価することによって表示することができる。

特定の観察条件とは、

(1) 明順応視 (photopic vision) であること。すなわち、明る過ぎても、まだ暗過ぎてもいけない。適当な明るさの範囲でなければならない。

(2) 観察視野径は、 2° (または 10°) のように限定されていること。 2° の場合は錐体視 (cone vision) に対応する。

(3) 視野の周辺は、暗黒であること。したがって、いわゆる開口色 (aperture color) として観察する。

(4) 視野内においては、光の空間的分布状態、時間的変化がなく定常であって、観察視野全面にわたって均等であること。

などである。

特定の観察条件のもとで、光 **A** と **B** とを (これを色刺激, color stimulus ともいう) 併置視野で比較してみる場合、それらの明るさの感覚と色感覚とが等しければ、視野の左半部と右半部とを識別することができない。この場合、色刺激 **A** と **B** とは等色 (color matching) する

“Colorimetric System” by Ryuichi Hioki (Faculty of Engineering, Chiba University, Chiba)

図1 等色視野

という。われわれの経験では、光の分光分布が異なった2つの光でも等色する。この現象をメタメリズム (metamerism) という。したがって、等色することを、2つの色刺激がメタメリック (metameric) であるともいう。

図1に示すように、視野の左半部から光AおよびB、右半部から光Cを見る場合、もし両半視野の明るさの感覚と色感覚とが等しければ、

$$A + B = C \quad (1)$$

なる式によって表わされる。これを等色式または色刺激方程式という。左半部の視野内のように、2つ（一般には2つ以上）の異なった光A、Bが、同時に肉眼の網膜の同じ個所に入射することによって、もとの光の色刺激AまたはBとは異なった新しい色刺激Cの生ずることを加法混色 (additive mixture) という。

2.2 三色光の加法混色

適当な間隔で選定した3つの単色光を $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ($\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$) とする。たとえば、 λ_1 と λ_3 は、光の可視スペクトルの両端に近い波長 ($\lambda_1 = 700.0 \text{ nm}$, $\lambda_3 = 435.8 \text{ nm}$)、 λ_2 はほぼ中央部の波長 ($\lambda_2 = 546.1 \text{ nm}$) とする。われわれの経験によれば、これらの3つの光の適当な量による加法混色によって、ほとんどすべての色刺激と等色することができる。このことは、Young-Helmholtz の色覚の三色説を裏書きするものとも考えられる。したがって色刺激を表示するのに、3つの単色光の混合量を目安 (表示の要素) として用いることができる。最初に選定した3つの単色光を表色系の原刺激 (fundamental stimuli, reference stimuli, primaries) という。

原刺激の選定は、まったく任意であって、必ずしもスペクトルの単色光を原刺激に選ぶ必要はない。たとえば3つの異なった色フィルターによって得られる色光でもさしつかえない。ただし、この場合は、2つの原刺激の加法混色によって、残りの原刺激に等色しないような原刺激 (これを、互いに独立な原刺激という) を選定しなければならない。

仮りに、波長 $\lambda_1 = 700.0 \text{ nm}$ (赤)、 $\lambda_2 = 546.1 \text{ nm}$ (緑)、 $\lambda_3 = 435.8 \text{ nm}$ (青) の単色光を原刺激 (それぞれ R, G, B で表わす) として考えよう。原刺激 R, G, B のそれぞれの m_1 量, m_2 量, m_3 量を加法混色して、色刺激 F に等色したとしよう。この場合、色刺激方程式を、

$$F = m_1 R + m_2 G + m_3 B \quad (2)$$

で表わす。この式は、原刺激の正量加法混色を意味する。しかし、いわゆる純度の大きい色刺激 F (たとえば $\lambda = 500 \text{ nm}$ の光) は、原刺激の正量加法混色では等色されない。この場合には、色刺激 F に原刺激のいずれか1つ、たとえば、原刺激 B の m_3 量を加法混色すれば、その混色刺激 ($F + m_3 B$) と、残りの原刺激 R, G の m_1 量, m_2 量との混色刺激 ($m_1 R + m_2 G$) とが等色する。この場合、色刺激方程式は、

$$F + m_3 B = m_1 R + m_2 G$$

で表わされ、これは形式的に、

$$F = m_1 R + m_2 G - m_3 B \quad (3)$$

と書き換えられる。上式は原刺激 B の負量加法混色を意味する。

そこで、 m_1, m_2, m_3 なる量を測る原刺激の単位のとおり方が問題になる。この単位は、光の明るさ、またはエネルギーのいずれを用いてもさしつかえない。しかし、取扱いの便宜を考えて、原刺激の単位はつぎのように定められている。原刺激の等量加法混色によって、特定の白色刺激 (これを基礎刺激 basic stimulus という。等エネルギースペクトルの白色刺激が用いられる) に等色するように、原刺激の量を測る単位を定める。

たとえば、原刺激 R, G, B の明るさ (測定量) を L_1, L_2, L_3 (lm) として、これを加法混色して、等エネルギースペクトルの白色刺激 W に等色したとすれば、色刺激方程式は、

$$W = 1 \cdot R + 1 \cdot G + 1 \cdot B \quad (4)$$

で表わされる。すなわち、原刺激 R, G, B のそれぞれの L_1, L_2, L_3 が原刺激の量を測る単位である。したがって、原刺激 R, G, B の ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 (lm) の明るさで加法混色して、色刺激 F に等色したとすれば、色刺激方程式は、

$$F = \frac{\phi_1}{L_1} R + \frac{\phi_2}{L_2} G + \frac{\phi_3}{L_3} B \quad (5)$$

で表わされる。上式と (2) 式とから、

$$m_1 = \frac{\phi_1}{L_1}, \quad m_2 = \frac{\phi_2}{L_2}, \quad m_3 = \frac{\phi_3}{L_3} \quad (6)$$

である。このようにして定めた単位を、三色単位 (trichromatic units) という。(2) 式、(4) 式または (5) 式などの色刺激方程式の右辺の記号 R, G, B は、原刺激 R, G, B を三色単位で測った原刺激の単位記号である。(2) 式、(6) 式の m_1, m_2, m_3 を色刺激 F の三刺激値 (tristimulus values) という。また、

$$l = m_1 + m_2 + m_3 \quad (7)$$

なる l を、刺激和という。

(2) 式の両辺を、 l で割ると、

$$\frac{1}{l}\mathbf{F} = \frac{m_1}{l}\mathbf{R} + \frac{m_2}{l}\mathbf{G} + \frac{m_3}{l}\mathbf{B} \quad (8)$$

これを

$$\mathbf{f} = n_1\mathbf{R} + n_2\mathbf{G} + n_3\mathbf{B} \quad (9)$$

で表わし、上式を、色刺激の単位方程式という。また、 n_1, n_2, n_3 を色刺激 $\mathbf{F}$ の色度座標 (chromaticity coordinates) という。

(8)式および(9)式から明らかなように、

$$n_1 + n_2 + n_3 = 1 \quad (10)$$

なる関係がある。

(2)式からわかるように、色刺激 $\mathbf{F}$ は、その三刺激値を成分 (m_1, m_2, m_3) とするベクトルとみなすことができるから、三刺激値を直交座標で表わした空間 (色刺激空間という) の一点によって、色刺激 $\mathbf{F}$ を代表させることができる。

図2 色刺激空間

図2は、原刺激を $\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}$ とする色刺激空間を示す。点 $\mathbf{F}$ は色刺激 $\mathbf{F}$ (m_1, m_2, m_3) を表わす点である。直線 $\mathbf{OF}$ 上またはその延長上にある色刺激は、明るさのある範囲にわたって、すべて同じ性質の色刺激である。この色刺激の性質を色度 (chromaticity) という。正三角形 $\mathbf{PMN}$ に平行な面内にある色刺激はすべて刺激和が一定である。刺激和が1である平面を単位平面という。

$$\mathbf{R} + \mathbf{G} + \mathbf{B} = 1$$

と直線 $\mathbf{OF}$ との交点の座標は、前に定義した色度座標 n_1, n_2, n_3 を与える。

色刺激 $\mathbf{F}$ の明るさは、

$$L = m_1L_1 + m_2L_2 + m_3L_3 \quad (11)$$

で与えられる。 L_1, L_2, L_3 は、前に述べたように、原刺激の単位量の明るさ (測光量) である。これを明度係数 (luminosity coefficients) という。

2.3 混色関数

原刺激 $\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}$ の加法混色によって、スペクトル光の波長 λ の色刺激に等色することができる。これを色刺激方程式で表わすと、

$$\mathbf{F}_\lambda = m_{1\lambda}\mathbf{R} + m_{2\lambda}\mathbf{G} + m_{3\lambda}\mathbf{B} \quad (12)$$

となる。すなわち、 $m_{1\lambda}, m_{2\lambda}, m_{3\lambda}$ は、波長 λ の色刺

図3 色刺激空間におけるスペクトル軌跡

激の三刺激値である。色刺激空間において、放射エネルギーが等しい各波長の色刺激を代表する点を連ねると、図3の点線で示すような空間曲線 $\mathbf{T}$ になる。波長 $\lambda = 700.0\text{nm}$, $\lambda = 546.1\text{nm}$, $\lambda = 435.8\text{nm}$ に対応する点は、原刺激であるから、 $\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}$ 軸上にくる。これらの色刺激空間における座標 $m_{1\lambda}, m_{2\lambda}, m_{3\lambda}$ は波長の関数である。これを $\bar{m}_1(\lambda), \bar{m}_2(\lambda), \bar{m}_3(\lambda)$ なる記号で表わし、等エネルギースペクトルの三刺激値であって、 $\bar{m}_1(\lambda), \bar{m}_2(\lambda), \bar{m}_3(\lambda)$ を混色関数 (color matching functions) という。混色関数は、三色説の色覚モデルを考えた場合の眼の3つの分光感度曲線に対応する。図3の実線で示す曲線 $\mathbf{S}$ は、座標原点 $\mathbf{O}$ を投影中心として、空間曲線 $\mathbf{T}$ を単位平面に投影したもので、これをスペクトル軌跡 (spectrum locus) という。スペクトル軌跡の両端を結んだ直線 (図は点線で示す) を、赤紫軌跡 (purple boundary) という。物理的に得られるすべての色光の色刺激の色度座標点は、スペクトル軌跡と赤紫軌跡とでかこまれた領域内で表わされる。単位平面上のこれらの色度座標点の座標面 (たとえば $\mathbf{RG}$ -平面) へ投影した図を色度図 (chromaticity diagram) という。

分光組成 $P(\lambda)$ を有する複合光の三刺激値 m_1, m_2, m_3 は、

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= \int_{\lambda} P(\lambda) \bar{m}_1(\lambda) d\lambda \\ m_2 &= \int_{\lambda} P(\lambda) \bar{m}_2(\lambda) d\lambda \\ m_3 &= \int_{\lambda} P(\lambda) \bar{m}_3(\lambda) d\lambda \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

で求められる。ただし、この場合、三刺激値の比例性および相加性が成り立つという仮定がおかれている。

3. CIE 表色系

3.1 序

原刺激を定めておけば、それらの混合量すなわち三刺激値によって、任意の色刺激を量的に表わすことができる。CIE (国際照明委員会) では、1931年に原刺激とし

て特定のものをを使用することのとりきめが行なわれた。この表色系を CIE 表色系という。CIE 表色系には、RGB 表色系と XYZ 表色系とがある。RGB 表色系は、XYZ 表色系を決定する根拠を明らかにするものであり、XYZ 表色系は、実際に表色系を使用する場合に便利であるように定められたものである。RGB 表色系は、混色実験のデータに基づいたものであるが、その実験における観測視野の大きさは 2° である。したがって、これから一次変換によって導き出された XYZ 表色系は、観測視野の大きさは 2° という条件にしばられている。この XYZ 表色系を、厳密には、CIE 1931 標準表色系という。これは、観測視野の大きさが 4° 以下の場合の心理物理色の表示に適用される。その後、CIE では、観測視野の大きさが 10° の混色実験のデータに基づいた $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系を決定した。これを CIE 1964 補助標準表色系という。これは観測視野の大きさが 4° を超える場合の心理物理色の表示に適用される。

3.2 RGB 表色系

RGB 表色系は、Wright¹⁾ および Guild²⁾ の混色実験(心理物理実験)の測定値に基づいて決定されている。原刺激として $\mathbf{R}(\lambda=700.0\text{nm})$, $\mathbf{G}(\lambda=546.1\text{nm})$, $\mathbf{B}(\lambda=435.8\text{nm})$ の単色光および基礎刺激としては等エネルギースペクトルの白色刺激が採用されている。

Wright は原刺激として波長 $\lambda_1=650\text{nm}$ (赤), $\lambda_2=530\text{nm}$ (緑), $\lambda_3=460\text{nm}$ (青) の単色光を用い、彼の考案した色度計によって、スペクトルの各波長に対する色度座標を求めた。Guild は原刺激として赤、緑、青の色フィルター(純度は、ほぼ 1 で、主波長はそれぞれ 630nm, 542nm, 460nm) を通過した光を用い、基礎刺激としては標準光源 $\mathbf{B}$ を採用して、彼の考案した色度計によってスペクトルの各波長に対する色度座標を求めた。両者のデータを、原刺激を $\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}$ に換算した値になおして平均化した値が表 1 に示すデータである。CIE は、このデータを正式に採用している。標準比視感度によって計算された原刺激の明度係数は、 $L_1=1$, $L_2=4.5907$, $L_3=0.0601$ である。表 1 の色度座標と明度係数とがわかれば、スペクトルの三刺激値すなわち混色関数 $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ が求められる。表 2 は、RGB 系の混色関数を示す。また、図 4 に、これを図示する。これは、ひとつのモデル化した肉眼の分光感度特性である。図 4 に示すような測色特性をもつ観測者を、CIE 1931 測色標準観測者という。

3.3 CIE 1931 標準表色系

RGB 表色系では、純度の大きい色刺激、たとえばスペクトルの単色光などは、原刺激を除いてすべて負量加混色になる。これをさけるために、CIE では、すべて

表 1 スペクトルの色度座標 (RGB 表色系)

波長 (nm)	$r(\lambda)$	$g(\lambda)$	$b(\lambda)$	波長 (nm)	$r(\lambda)$	$g(\lambda)$	$b(\lambda)$
380	0.0272	-0.0115	0.9843	580	0.6449	0.3579	-0.0028
385	0.0268	-0.0114	0.9846	585	0.7071	0.2952	-0.0023
390	0.0263	-0.0114	0.9851	590	0.7617	0.2402	-0.0019
395	0.0256	-0.0113	0.9857	595	0.8087	0.1928	-0.0015
400	0.0247	-0.0112	0.9865	600	0.8475	0.1537	-0.0012
405	0.0237	-0.0111	0.9874	605	0.8800	0.1209	-0.0009
410	0.0225	-0.0109	0.9884	610	0.9059	0.0949	-0.0008
415	0.0207	-0.0104	0.9897	615	0.9265	0.0741	-0.0006
420	0.0181	-0.0094	0.9913	620	0.9425	0.0580	-0.0005
425	0.0142	-0.0076	0.9934	625	0.9550	0.0454	-0.0004
430	0.0088	-0.0048	0.9960	630	0.9649	0.0354	-0.0003
435	0.0012	-0.0007	0.9995	635	0.9730	0.0272	-0.0002
440	-0.0084	0.0048	1.0036	640	0.9797	0.0205	-0.0002
445	-0.0213	0.0120	1.0093	645	0.9850	0.0152	-0.0002
450	-0.0390	0.0218	1.0172	650	0.9888	0.0113	-0.0001
455	-0.0618	0.0345	1.0273	655	0.9918	0.0083	-0.0001
460	-0.0909	0.0517	1.0392	660	0.9940	0.0061	-0.0001
465	-0.1281	0.0762	1.0519	665	0.9954	0.0047	-0.0001
470	-0.1821	0.1175	1.0646	670	0.9966	0.0035	-0.0001
475	-0.2584	0.1840	1.0744	675	0.9975	0.0025	0.0000
480	-0.3667	0.2906	1.0761	680	0.9984	0.0016	0.0000
485	-0.5200	0.4568	1.0632	685	0.9991	0.0009	0.0000
490	-0.7150	0.6996	1.0154	690	0.9996	0.0004	0.0000
495	-0.9459	1.0247	0.9212	695	0.9999	0.0001	0.0000
500	-1.1685	1.3905	0.7780	700	1.0000	0.0000	0.0000
505	-1.3182	1.7195	0.5987	705	1.0000	0.0000	0.0000
510	-1.3371	1.9318	0.4053	710	1.0000	0.0000	0.0000
515	-1.2076	1.9699	0.2377	715	1.0000	0.0000	0.0000
520	-0.9830	1.8534	0.1296	720	1.0000	0.0000	0.0000
525	-0.7386	1.6662	0.0724	725	1.0000	0.0000	0.0000
530	-0.5159	1.4761	0.0398	730	1.0000	0.0000	0.0000
535	-0.3304	1.3105	0.0199	735	1.0000	0.0000	0.0000
540	-0.1707	1.1628	0.0079	740	1.0000	0.0000	0.0000
545	-0.0293	1.0282	0.0011	745	1.0000	0.0000	0.0000
550	0.0974	0.9051	-0.0025	750	1.0000	0.0000	0.0000
555	0.2121	0.7919	-0.0040	755	1.0000	0.0000	0.0000
560	0.3164	0.6881	-0.0045	760	1.0000	0.0000	0.0000
565	0.4112	0.5932	-0.0044	765	1.0000	0.0000	0.0000
570	0.4973	0.5067	-0.0040	770	1.0000	0.0000	0.0000
575	0.5751	0.4283	-0.0034	775	1.0000	0.0000	0.0000
580	0.6449	0.3579	-0.0028	780	1.0000	0.0000	0.0000

の色刺激が原刺激の正量加法混色で表わされるような原刺激 $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$ を決定した。

原刺激 $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$ は、つぎの条件が満たされるように定められている。

(1) 基礎刺激には、等エネルギースペクトルの白色刺激を用いる。

(2) RGB 表色系の色刺激空間において、原刺激 $\mathbf{X}, \mathbf{Z}$ が $R+4.5907G+0.0601B=0$ なる平面 (Alyche という) 上にくるように、原刺激 $\mathbf{X}, \mathbf{Z}$ をとる。いいかえれば、原刺激 $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$ の明度係数が $L_1=0$, $L_2=1$, $L_3=0$ となる。したがって、任意の色刺激の明るさ(測光量は、原刺激 $\mathbf{Y}$ の成分、すなわち三刺激値 Y によって表わされることになる。

(3) XY 平面が座標原点を通過、単位平面上の

を原刺激とする表色系が, XYZ 表色系すなわち, CIE 1931 標準表色系である。いかえれば, RGB 表色系の原刺激 R, G, B を, 仮想的な原刺激 X, Y, Z に数学的に変換したものである。

RGB 表色系における三刺激値 R, G, B と CIE 1931 標準表色系 (XYZ 表色系) における三刺激値 X, Y, Z との間には, つぎの関係が存在する。

$$\left. \begin{aligned} X &= 2.7689R + 1.7517G + 1.1302B \\ Y &= 1.0000R + 4.5907G + 0.0601B \\ Z &= 0.0565G + 5.5943B \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

また, RGB 表色系における色度座標 (r, g) と XYZ 表色系における色度座標 (x, y) との間には,

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{0.29000r + 0.11000g + 0.20000}{-0.53366r - 0.06823g + 1.20063} \\ y &= \frac{0.16634r + 0.80177g + 0.01063}{-0.53366r - 0.06823g + 1.20063} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

なる関係がある。表 1 の $r(\lambda), g(\lambda)$ の数値を, (15) 式に代入すれば, XYZ 表色系におけるスペクトルの色度

図 7 (x, y) 色度図

座標 $x(\lambda), y(\lambda)$ が求められる。これを表 3 に示す。図 7 は, これを xy 直交座標で表わしたものの, すなわち, (x, y) 色度図である。また, 表 2 の $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda)$ の数値を (14) 式に代入すれば, XYZ 表色系におけるスペクトル三刺激値すなわち混色関数 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ が求められる。これを表 4 に示す。図 8 は, 混色関数を図示したものである。混色関数の $\bar{y}(\lambda)$ は, 明順応標準視感度関数 $V(\lambda)$ に等しいことはいうまでもない。

3.4 CIE 1964 補助標準表色系

観測視野の大きさが 4° を超える場合における色刺激の表示に適用される XYZ 表色系として, CIE 1964 補助標準表色系が定められている。これを $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系ともいう。

表 3 スペクトルの色度座標 (CIE 1931 XYZ 標準表色系)

波長 (nm)	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$	波長 (nm)	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
380	0.1741	0.0050	0.8209	580	0.5125	0.4866	0.0009
385	0.1740	0.0050	0.8210	585	0.5448	0.4544	0.0008
390	0.1738	0.0049	0.8213	590	0.5752	0.4242	0.0005
395	0.1736	0.0049	0.8215	595	0.6029	0.3965	0.0006
400	0.1733	0.0048	0.8219	600	0.6270	0.3725	0.0005
405	0.1730	0.0048	0.8222	605	0.6482	0.3514	0.0004
410	0.1726	0.0048	0.8226	610	0.6658	0.3340	0.0002
415	0.1721	0.0048	0.8231	615	0.6801	0.3197	0.0002
420	0.1714	0.0051	0.8235	620	0.6915	0.3083	0.0002
425	0.1703	0.0058	0.8239	625	0.7006	0.2993	0.0001
430	0.1689	0.0069	0.8242	630	0.7079	0.2920	0.0001
435	0.1669	0.0086	0.8245	635	0.7140	0.2859	0.0001
440	0.1644	0.0109	0.8247	640	0.7190	0.2809	0.0001
445	0.1611	0.0138	0.8251	645	0.7230	0.2770	0.0000
450	0.1566	0.0177	0.8257	650	0.7260	0.2740	0.0000
455	0.1510	0.0227	0.8263	655	0.7283	0.2717	0.000000
460	0.1440	0.0297	0.8263	660	0.7300	0.2700	0.0000
465	0.1355	0.0399	0.8246	665	0.7311	0.2689	0.0000
470	0.1241	0.0578	0.8181	670	0.7320	0.2680	0.0000
475	0.1096	0.0868	0.8036	675	0.7327	0.2673	0.0000
480	0.0913	0.1327	0.2760	680	0.7334	0.2666	0.0000
485	0.0687	0.2007	0.7306	685	0.7340	0.2660	0.0000
490	0.0454	0.2950	0.6596	690	0.7344	0.2656	0.0000
495	0.0235	0.4127	0.5638	695	0.7346	0.2654	0.0000
500	0.0082	0.5384	0.4534	700	0.7347	0.2653	0.0000
505	0.0039	0.6548	0.3413	705	0.7347	0.2653	0.0000
510	0.0139	0.7502	0.2359	710	0.7347	0.2653	0.0000
515	0.0389	0.8120	0.1491	715	0.7347	0.2653	0.0000
520	0.0743	0.8338	0.0919	720	0.7347	0.2653	0.0000
525	0.1142	0.8262	0.0596	725	0.7347	0.2653	0.0000
530	0.1547	0.8059	0.0394	730	0.7347	0.2653	0.0000
535	0.1929	0.7816	0.0255	735	0.7347	0.2653	0.0000
540	0.2296	0.7543	0.0161	740	0.7347	0.2653	0.0000
545	0.2658	0.7243	0.0099	745	0.7347	0.2653	0.0000
550	0.3016	0.6923	0.0061	750	0.7347	0.2653	0.0000
555	0.3373	0.6589	0.0038	755	0.7347	0.2653	0.0000
560	0.3731	0.6245	0.0024	760	0.7347	0.2653	0.0000
565	0.4087	0.5896	0.0017	765	0.7347	0.2653	0.0000
570	0.4441	0.5547	0.0012	770	0.7347	0.2653	0.0000
575	0.4788	0.5202	0.0010	775	0.7347	0.2653	0.0000
580	0.5125	0.4866	0.0009	780	0.7347	0.2653	0.0000

この表色系は, Stiles-Burch³⁾ および Speranskaya⁴⁾ の 10° 視野における混色実験のデータに基づいて定められたものである。この混色実験のデータは, 前に述べた Wright および Guild の混色実験のように色度座標のデータではなく, 原刺激の混合量すなわち混色関数を直接に求めたものである。Stiles-Burch の使用した原刺激と Speranskaya の使用した原刺激とは同じものではない。そこで, 原刺激を R (波長 $\lambda_1=645.2\text{nm}$), G ($\lambda_2=526.3\text{nm}$), B ($\lambda_3=444.4\text{nm}$) に換算して, 両者のデータを比較し, それらの平均値が混色関数 $\bar{r}_{10}(\lambda), \bar{g}_{10}(\lambda), \bar{b}_{10}(\lambda)$ の最終値として採用されている。図 9 に, これを示す。いま, 仮りにこれを $R_{10}G_{10}B_{10}$ 表色系としておく。

表 4 等エネルギースペクトルの三刺激値
(CIE 1931 XYZ 標準表色系)

波 長 (nm)	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	波 長 (nm)	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$
380	0.0014	0.0000	0.0065	580	0.9163	0.8700	0.0017
385	0.0022	0.0001	0.0105	585	0.9786	0.8163	0.0014
390	0.0042	0.0001	0.0201	590	1.0263	0.7570	0.0011
395	0.0076	0.0002	0.0362	595	1.0567	0.6949	0.0010
400	0.0143	0.0004	0.0679	600	1.0622	0.6310	0.0008
405	0.0232	0.0006	0.1102	605	1.0456	0.5668	0.0006
410	0.0435	0.0012	0.2074	610	1.0026	0.5030	0.0002
415	0.0776	0.0022	0.3713	615	0.9384	0.4412	0.0002
420	0.1344	0.0040	0.6456	620	0.8544	0.3810	0.0002
425	0.2148	0.0073	1.0391	625	0.7514	0.3210	0.0001
430	0.2839	0.0116	1.3856	630	0.6424	0.2650	0.0000
435	0.3285	0.0168	1.6230	635	0.5419	0.2170	0.0000
440	0.3483	0.0230	1.7471	640	0.4479	0.1750	0.0000
445	0.3481	0.0298	1.7826	645	0.3608	0.1382	0.0000
450	0.3362	0.0380	1.7721	650	0.2835	0.1070	0.0000
455	0.3187	0.0480	1.7441	655	0.2187	0.0816	0.0000
460	0.2908	0.0600	1.6692	660	0.1649	0.0610	0.0000
465	0.2511	0.0739	1.5381	665	0.1212	0.0446	0.0000
470	0.1954	0.0910	1.2876	670	0.0874	0.0320	0.0000
475	0.1421	0.1126	1.0419	675	0.0636	0.0232	0.0000
480	0.0956	0.1390	0.8130	680	0.0468	0.0170	0.0000
485	0.0580	0.1693	0.6162	685	0.0329	0.0119	0.0000
490	0.0320	0.2080	0.4652	690	0.0227	0.0082	0.0000
495	0.0147	0.2586	0.3533	695	0.0158	0.0057	0.0000
500	0.0049	0.3230	0.2720	700	0.0114	0.0041	0.0000
505	0.0024	0.4073	0.2123	705	0.0081	0.0029	0.0000
510	0.0093	0.5030	0.1582	710	0.0058	0.0021	0.0000
515	0.0291	0.6082	0.1117	715	0.0041	0.0015	0.0000
520	0.0133	0.7100	0.0782	720	0.0029	0.0010	0.0000
525	0.1096	0.7932	0.0573	725	0.0020	0.0007	0.0000
530	0.1655	0.8620	0.0422	730	0.0014	0.0005	0.0000
535	0.2257	0.9149	0.0298	735	0.0010	0.0004	0.0000
540	0.2904	0.9540	0.0203	740	0.0007	0.0003	0.0000
545	0.3597	0.9803	0.0134	745	0.0005	0.0002	0.0000
550	0.4334	0.9950	0.0087	750	0.0003	0.0001	0.0000
555	0.5121	1.0002	0.0057	755	0.0002	0.0001	0.0000
560	0.5945	0.9950	0.0039	760	0.0002	0.0001	0.0000
565	0.6784	0.9786	0.0027	765	0.0001	0.0000	0.0000
570	0.7621	0.9520	0.0021	770	0.0001	0.0000	0.0000
575	0.8425	0.9154	0.0018	775	0.0000	0.0000	0.0000
580	0.9163	0.8700	0.0017	780	0.0000	0.0000	0.0000
和					21.3713	21.3714	21.3715

図 8 XYZ 系の混色関数

図 9 $R_{10}G_{10}B_{10}$ 表色系の混色関数

$X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系の原刺激 X_{10} , Y_{10} , Z_{10} は, $R_{10}G_{10}B_{10}$ 表色系の混色関数に基づいて, CIE 1931 標準表色系の場合と, できるだけ同じ考え方に従って決定されている。

$R_{10}G_{10}B_{10}$ 表色系における三刺激値 R_{10} , G_{10} , B_{10} と $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系における三刺激値 X_{10} , Y_{10} , Z_{10} との間には, つぎの関係がある。

$$\left. \begin{aligned} X_{10} &= 0.341427R_{10} + 0.188273G_{10} + 0.390202B_{10} \\ Y_{10} &= 0.138972R_{10} + 0.837182G_{10} + 0.073588B_{10} \\ Z_{10} &= 0.0375154G_{10} + 2.038878B_{10} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$R_{10}G_{10}B_{10}$ 表色系の混色関数のデータを, (16) 式に代入すれば, $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系のスペクトル刺激値すなわち, 混色関数 $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ が求められる。表 5 に, これらの数値を示す。なお, 図 10 はこれを図示したものである。また, スペクトルの色度座標 $x_{10}(\lambda)$, $y_{10}(\lambda)$ は, 表 5 の数値から容易に求められる。

図 10 $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系の混色関数

混色関数 $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ は CIE 1931 XYZ 表色系における値とはいくらか異なっている。とくに注意しなければならないことは, $\bar{y}_{10}(\lambda)$ の値は明順応比視感度関数 $V(\lambda)$ と異なっている点である。したがって, 分光組成 $P(\lambda)$ をもつ色刺激の三刺激値 Y_{10} の値は, XYZ 表色系の場合のように測光量に対応するものではない。ただし, それに近い値に対応すると考えてよい。その他, 表色系としての取扱い方は, CIE 1931 標準表

表 5 等エネルギースペクトルの三刺激値
(CIE 1964 補助標準表色系)

波 長 λ (nm)	三 刺 激 値			波 長 λ (nm)	三 刺 激 値		
	$\bar{x}_{10}(\lambda)$	$\bar{y}_{10}(\lambda)$	$\bar{z}_{10}(\lambda)$		$\bar{x}_{10}(\lambda)$	$\bar{y}_{10}(\lambda)$	$\bar{z}_{10}(\lambda)$
380	0.0002	0.0000	0.0007	580	1.0142	0.8689	0.0000
385	0.0007	0.0001	0.0029	585	1.0743	0.8256	
390	0.0024	0.0003	0.0105	590	1.1185	0.7774	
395	0.0072	0.0008	0.0323	595	1.1343	0.7204	
400	0.0191	0.0020	0.0860	600	1.1240	0.6583	
405	0.0434	0.0045	0.1971	605	1.0891	0.5939	
410	0.0847	0.0088	0.3894	610	1.0305	0.5280	
415	0.1406	0.0145	0.6568	615	0.9507	0.4618	
420	0.2045	0.0214	0.9725	620	0.8563	0.3981	
425	0.2647	0.0295	1.2825	625	0.7549	0.3396	
430	0.3147	0.0387	1.5535	630	0.6475	0.2835	
435	0.3577	0.0496	1.7985	635	0.5351	0.2283	
440	0.3837	0.0621	1.9673	640	0.4316	0.1798	
445	0.3867	0.0747	2.0273	645	0.3437	0.1402	
450	0.3707	0.0895	1.9948	650	0.2683	0.1076	
455	0.3430	0.1063	1.9007	655	0.2043	0.0812	
460	0.3023	0.1282	1.7454	660	0.1526	0.0603	
465	0.2541	0.1528	1.5549	665	0.1122	0.0441	
470	0.1956	0.1852	1.3176	670	0.0813	0.0318	
475	0.1323	0.2199	1.0302	675	0.0579	0.0226	
480	0.0805	0.2536	0.7721	680	0.0409	0.0159	
485	0.0411	0.2977	0.5701	685	0.0286	0.0111	
490	0.0162	0.3391	0.4153	690	0.0199	0.0077	
495	0.0051	0.3954	0.3024	695	0.0138	0.0054	
500	0.0038	0.4608	0.2185	700	0.0096	0.0037	
505	0.0154	0.5314	0.1592	705	0.0066	0.0026	
510	0.0375	0.6067	0.1120	710	0.0046	0.0018	
515	0.0714	0.6857	0.0822	715	0.0031	0.0012	
520	0.1177	0.7618	0.0607	720	0.0022	0.0008	
525	0.1730	0.8233	0.0431	725	0.0015	0.0006	
530	0.2365	0.8752	0.0305	730	0.0010	0.0004	
535	0.3042	0.9238	0.0206	735	0.0007	0.0003	
540	0.3768	0.9620	0.0137	740	0.0005	0.0002	
545	0.4516	0.9822	0.0079	745	0.0004	0.0001	
550	0.5298	0.9918	0.0040	750	0.0003	0.0001	
555	0.6161	0.9991	0.0011	755	0.0002	0.0001	
560	0.7052	0.9973	0.0000	760	0.0001	0.0000	
565	0.7938	0.9824		765	0.0001		
570	0.8787	0.9555		770	0.0001		
575	0.9512	0.9152		775	0.0000		
580	1.0142	0.8689		780	0.0000		
和				23.3294	23.3323	23.3343	

色系における場合と全く同様である。

3.5 色(心理物理色)の表示方法

色刺激を表示するには、CIE 1931 標準表色系または CIE 1964 補助標準表色系のいずれかが用いられる。後者の場合は、 Y_{10} とか x_{10} , y_{10} のように添字 10 を記して区別を明らかにする。以下、前者を用いるとして説明する。

(1) 色光の場合(光源の心理物理色): 分光組成 $P(\lambda)$ (たとえば W/nm) を有する色光の三刺激値 X , Y , Z は、(13)式で表わしたように、

$$X = K_m \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

982 (58)

$$\left. \begin{aligned} Y &= K_m \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= K_m \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

で与えられる。 $\bar{y}(\lambda) = V(\lambda)$ (標準比視感度) は、放射束の 1/680 W に対する明るさ(測光量)を lm 単位で表わした数値に相当するから、三刺激値 Y に 680(lm/W) を乗ずると、lm 単位で表わした数値になる。この場合、 K_m を最大視感度という。

もし、 $P(\lambda)$ が分光分布(相対値)で表わされている場合には、(17)式の第2式において、 K_m を定めなくてはならない。それには、その光源の測光値(たとえば光度、その他)を他の方法、すなわち測光を行なって決定する。 Y の数値が測光量の数値と一致するように K_m を定める。しかし、色度座標 x , y を求めるためには、この方法は必ずしも必要でない。

色度座標 x , y は、

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (18)$$

によって計算される。

したがって、色光の心理物理色を表示するには、三刺激値 Y (測光量)と色度座標 x , y とを用いる。

(2) 物体によって反射(または透過)した光の場合(物体の心理物理色、単に物体色という): 物体の分光反射率(または透過率)を $\rho(\lambda)$ とすれば、三刺激値 X , Y , Z は、

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{1}{K} \int_{380}^{780} P(\lambda) \rho(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= \frac{1}{K} \int_{380}^{780} P(\lambda) \rho(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= \frac{1}{K} \int_{380}^{780} P(\lambda) \rho(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

ここに、 $P(\lambda)$ は、物体を照明する光、すなわち標準照明の分光分布(相対値)である。また、

$$K = \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

である。

したがって、物体の心理物理色の三刺激値は、物体によって反射(または透過)された光の三刺激値と、照明する光の三刺激値 Y との比である。(19)式の第2式で表わされる三刺激値 Y を視感反射(または透過)率という。表示は、視感反射(または透過)率 Y と色度座標 x , y とによって行なわれる。一般に、 Y の値としては 100 倍した数値で % 表示される。

標準照明としては、特定の白色光が定められている。CIE では、標準照明 A, B, C が定められており、また CIE 昼光として標準照明 D₆₅₀₀ が定められている。これ

らはいずれも分光分布が規定されている。

3.6 CIE 1960 UCS 色度図

CIE 1931 標準色度図 (x, y) 上において、同じ明るさを有する2つの色刺激の色度を見分ける最小の色度差(識別域という)を表わす2点間の距離は、色度図上のそれぞれの場所によって異なる。したがって色度図上で表わされた色度点間の距離は、感覚的な色の性質の差に比例しない。もし感覚的な色の性質の差が色度図上の2点間の距離で表わされるような色度図を求めることができれば、きわめて都合である。このような色度図をUCS色度図(uniform chromaticity scale diagram)という。UCS色度図を求める試みが、1935年以来、多くの研究者によって行われてきた。それらの代表的なものとして、Judd⁵⁾、MacAdam⁶⁾、Breckenridge and Schaub⁷⁾、Scofield-Judd-Hunter⁸⁾などのUCS色度図をあげることができる。これらはいずれも大同小異であって、これというきめ手がなかった。1960年に至ってCIEは、CIE 1931標準色度図よりも知覚的に、より均等な色間隔を示す色度図を必要とする場合には、暫定的に上記のMacAdamのUCS色度図を使用することを勧告している。これをCIE 1960 UCS色度図という。この色度図に基づいた表色系を、UVW表色系ということもある。

MacAdam⁶⁾は、JuddのUCS色度図におけるスペクトル軌跡の形をそのままに保存して、きわめて簡単な変換によるUVW表色系を提案した。この表色系による三刺激値 U, V, W と、XYZ表色系による三刺激値 X, Y, Z との間には、つぎの関係がある。

$$\left. \begin{aligned} U &= \frac{2}{3}X \\ V &= Y \\ W &= -\frac{1}{2}X + \frac{3}{2}Y + \frac{1}{2}Z \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

また、両表色系の色度座標 (u, v) と (x, y) との間には、

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \\ v &= \frac{6y}{-2x + 12y + 3} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

なる関係がある。表3に示す $x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$ の数値を(21)式に代入して、各波長に対する色度座標を求めてプロットすれば図11のようになる。上記の変換式(20)または(21)は、XYZ表色系または $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系のいずれから行なってもよい。また、表4の $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ の数値を(20)式に代入すれば、UVW表色系における混色関数が求められる。図12に、これを示す。なお、この表色系の明度係数は、 $L_U=0, L_V=1, L_W=0$ である。

図 11 CIE 1960 UCS 色度図

図 12 UVW 表色系の混色関数

4. 色(知覚色)の表示

4.1 序

2章、3章で述べてきた表色系は、心理物理色に関する表色系である。しかし、色には心理的概念に基づいた知覚色とよばれるカテゴリーに属する色がある。たとえば、マンセル色票の色とよばれるものは、一般に知覚色である。知覚色は、1章で述べたように、色の心理的属性、すなわち、明度とクロマティックネスとによって表わされる。マンセル色票系では、色を色相、明度、彩度によって表わしているが、色相と彩度との属性をまとめたものがクロマティックネスである。マンセル色票系では、物体標準として、三属性に従って体系的に配列した色票集を作成して、これに、色相、パリュール、クロマと称して適当な記号数字を対応させている。試料の物体表面(無光沢の)の知覚色は、その表面とマンセル色票集の色票とを参照比較することによって、試料をマンセル記号で表示することができる。

一方、知覚色を表示する表色系として、ULCS表色系(uniform lightness-chromaticness scale system)が、1940~1950年代にわたって多くの研究者によって提案

されている。これは、心理物理色を代表する色刺激空間を均等知覚色空間へ変換しようとする試みである。その代表的なものとして、Godlove⁹⁾, Adams¹⁰⁾, Moon-Spencer¹¹⁾, Saunderson-Milner¹²⁾, Scofield-Judd-Hunter¹³⁾, Hunter¹⁴⁾, Klein¹⁵⁾, Glasser¹⁶⁾, Billmeyer-Basley-Shelder¹⁷⁾, Wyszecki¹⁸⁾ その他のものをあげることができる。これらは、いずれも国際的には承認されるところとはならなかったが、1963 年に CIE で、Wyszecki¹⁹⁾ の提案した $U^*V^*W^*$ 表色系が、CIE 1964 均等知覚色空間をもたらす表色系として採択された。

4.2 修正マンセル表色系

1929 年に発行された Munsell Book of Color (色票集) における知覚的な等歩度分割の不規則性を改良するために、米国光学会では、測色委員会を開いてこの検討を行ない、1943 年に一応の結論が得られた²⁰⁾。これらの結果に基づいたものが、修正マンセル表色系 (Munsell Renotation System) とよばれる。

マンセル色票集は、昼光に順応した肉眼で、中明度以上の無彩色面を周辺視野として、標準光源 C で 45° 方向から照明し、ほぼ垂直方向からみる場合 (またはこの逆) の知覚色を心理的属性、すなわち色相、明度、彩度に従って体系的に配列したものである。したがって、直接に色相、明度、彩度を測るわけにはいかない。

そこで、これらの色票の表面からの反射光による心理物理色を求め (分光比反射率を測ることによって求められる)、これらの間の規則性の有無について検討を行なった。米国測色委員会は、多くの観測者によって、視感反射率 Y と、明度 V との関係を実験的に検討して、

$$Y = 1.2219V - 0.23111V^2 + 0.23951V^3 - 0.021009V^4 + 0.0008404V^5 \quad (22)$$

なる関係が、 $V=5$ の無彩色面を周辺視野とする場合、もっとも妥当であると結論した。ただし、 Y は標準白色面 (MgO の煙着面) の値を 100 とする。(22) 式をマンセルの明度関数 (value function) という。

また、マンセル色票の分光比反射率を測定し、それらの心理物理色の色度座標を求め、これを色度図上に表わすと、かなりの不規則性、すなわち同色相および同彩度の色度点がそれぞれ円滑な曲線上にこないことが見出された。そこで多くの観測者によって、色相、彩度について知覚的に検討を行ない、Adams¹⁰⁾ のクロマティックバリュー色度図を利用して、各色票に関するクロマティックネスの分布の円滑化をはかった。このようにして、各バリュー ($V=1, 2, 3, \dots, 9$) について、色相 $H=\text{const.}$ 、彩度 $C=\text{const.}$ なる色票の心理物理色の色度図上における軌跡が決定された。すなわち、マンセル色票の記号 (HV/C) と、それに対応する心理物理色として

図 13 $V=5$ における同色相、同彩度の曲線群

の XYZ 表色系における表示 (Y, x, y) との関係が決定された。これすなわち、修正マンセル表色系である。

図 13 は、 $V=5$ における $H=\text{const.}$ 、 $C=\text{const.}$ なる曲線群を表わす。renotation によって、マンセル色票 (反射物体表面) の知覚色とその心理物理色との関係が明らかにされたことになる。

4.3 CIE 1964 均等知覚色空間

反射物体表面の色に関して、その心理物理色としてのデータを、反射物体表面の知覚色に換算する範式が種々提案されている。すなわち前に述べた ULCS 表色系である。これは反射物体表面に関する色刺激空間と知覚色空間との対応とも考えられる。1963 年の CIE 会議で、つぎの式によって表わされる均等知覚色空間を使用することが推奨された。これは、Wyszecki¹⁹⁾ の提案によるものである。

$$\left. \begin{aligned} W^* &= 25 Y^{1/3} - 17 \quad (1 \leq Y \leq 100) \\ U^* &= 13 W^* (u - u_0) \\ V^* &= 13 W^* (v - v_0) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

ここに、 Y は XYZ 表色系による三刺激値 Y の値 (% 表示)、また、 u, v は (21) 式による CIE 1960 UCS 色度座標で、 u_0, v_0 は標準照明の色度座標である。(23) 式の W^* を明度指数 (lightness index)、 U^*V^* をクロマティックネス指数 (chromaticness index) とよんでいる。(23) 式の第 1 式は、一種の明度関数式で、ちょうどマンセルの明度関数式を 10 倍した値ときわめてよく合致する。(23) 式の第 2 式および第 3 式は、色度をクロマティックネスに換算するものであって、係数 13 は、均等知覚色空間の明度軸の単位とクロマティックネス軸の単位との比を定めるものである。また、 $(u - u_0)$ および $(v - v_0)$ は、すべての無彩色に対応する点を明度軸上にもってくるためのものである。図 14 は、マンセル表色系の $V=5$ のデータを U^*V^* 平面にプロットしたものである。

CIE 1964 均等知覚色空間を構成する表色系を $U^*V^*W^*$ 表色系ともいう。の表色系は反射物体表面の知覚色

図 14 U^*V^* 表面にプロットした Munsell データ

に対して適用されるものであり、厳密に言えば、カラーテレビの受像管面におけるような光を発するものの知覚色に関しては適用することができない。

(23)式の第1式は、反射物体表面の知覚色の明度と、その表面の心理物理色の三刺激値 Y との関係を表わした実験式である。三刺激値 Y は、いうまでもなく、物体表面の視感反射率(％で表わしたもの)である。

一方、光を発する物体表面の心理物理色の三刺激値 Y は輝度の単位で表わされ、視感反射率とはまったく異なるものである。したがって、反射物体表面の視感反射率とその表面の知覚色の明度との関係を表わす(23)式の第1式を、そのまま光を発する物体表面の知覚色に対して適用することは妥当でない。

また、(23)式の第2式および第3式で表わされるクロマティックネス指数 U^*V^* は $13W^*$ という係数を含んでいるが、この係数はマンセル表色系における1 value step が2 chroma step に対応するという仮定に基づいて定められたものである。ある場合には、この仮定がそのまま成立するが、1 value step が chroma の幾 steps に対応するかは、一般には観察条件によって著しく異なってくる。

1 value step が1 chroma step に対応するものから、1 value step が8 chroma steps に対応するものに至るまで、種々の実験結果が報告されている。この点から考えても、(23)式の第1式の Y の値を、後で述べるように規格化しても、(23)式で表わされる $U^*V^*W^*$ 表色系を、そのままの形でカラーテレビの受像管の知覚色に適用することには疑問がある。

しかし、実用的便法として、たとえばつぎのような仮定をすれば、(23)式の第1式を、カラー受像管面の知覚色に準用することができる。すなわち、受像管面で最大輝度をもつテレビホワイトの輝度を、 $Y=100$ と規格化し、かつ反射物体表面の知覚色に関する明度関数式が、そのままの形でカラー受像管面の知覚色に対しても適用

できると仮定すれば、(23)式の第1式は、カラー受像管面の知覚色に準用してもさしつかえない。

また、カラー受像管面の知覚色のクロマティックネスと、反射物体表面の知覚色のクロマティックネスとをまったく同等に取扱ってもよいと仮定すれば、(23)式の第2式および第3式は、そのままの形でカラー受像管面の知覚色に準用することができる。

以上述べた種々の仮定については、今後充分に検討を加えなければならない問題が残されている。光を発する物体表面の知覚色に関する均等知覚色空間と、反射物体表面の知覚色に関する均等知覚色空間との関係は、今後の研究課題のひとつである。

5. む す び

実用的見地から、表色系について解説を行なった。これを要約すると、つぎのとおりである。

(1) 色の定義として、知覚色と心理物理色とのカテゴリーに分けて説明した。(2)心理物理色の表示の基礎について述べ、(3)現用されている CIE 1931 標準表色系および CIE 1964 補助標準表色系について説明し、これらによる心理物理色の表示方法に触れた。(4)知覚色の表色系として、修正マンセル表色系および CIE 1964 均等知覚色空間について説明した。

なお、最初の予定では、測色についても述べることになっていたが、紙面の都合でこれは割愛した。

〔参 考 文 献〕

- 1) W. D. Wright: Trans. Opt. Soc., **30** (1929) 141; **31** (1930) 201
- 2) J. Guild: Phil. Trans. Roy. Soc. A., **230** (1931) 149
- 3) W. S. Stiles and J. M. Burch: Optica Acta, **2** (1955) 168; **6** (1959) 1
- 4) N. I. Speranskaya: Optics and Spectroscopy, **7** (1959) 424
- 5) D. B. Judd: J. Res. N. B. S., **14** (1935) 41
- 6) D. L. MacAdam: J. Opt. Soc. Am., **27** (1937) 294
- 7) F. C. Breckenridge and W. R. Schaub: J. Opt. Soc. Am., **29** (1939) 370
- 8) F. Scofield, D. B. Judd and R. S. Hunter: A. S. T. M. Bulletin., (1941) 19
- 9) I. H. Godlove: J. Opt. Soc. Am., **42** (1952) 204
- 10) E. Q. Adams: J. Opt. Soc. Am., **32** (1942) 168
- 11) P. Moon and D. E. Spencer: J. Opt. Soc. Am., **32** (1942) 270
- 12) J. L. Saunderson and B. I. Milner: J. Opt. Soc. Am., **35** (1946) 36
- 13) R. S. Hunter: J. Opt. Soc. Am., **32** (1942) 509
- 14) R. S. Hunter: J. Opt. Soc. Am., **38** (1948) 1094; **48** (1958) 985
- 15) F. H. De Kleine: J. Opt. Soc. Am., **48** (1958) 722
- 16) L. G. Glasser, A. H. MacKinney, C. D. Relley and P. D. Schnelle: J. Opt. Soc. Am., **48** (1958) 736
- 17) F. W. Billmeyer Jr., J. K. Beasley and J. A. Shelder: J. Opt. Soc. Am., **51** (1961) 656
- 18) G. Wyszecki: J. Opt. Soc. Am., **44** (1954) 725
- 19) G. Wyszecki: CIE Compte Rendu Quinzième Session (1963) 35; J. Opt. Soc. Am., **53** (1963) 1318
- 20) S. M. Newhall, D. Nickerson and D. B. Judd: J. Opt. Soc. Am., **33** (1943) 385