色 差 と UCS 表 色 系

大阪工業技術試験所 福 田 保

1. ま え が き

色差を数値的に表示するための研究は、CIE 1931 表色系の確立後活発に行なわれ、各種の色差の識別実験をできるだけ満足するような、均等明度スケール、および UCS がみちびき出され、さらに、両者を組合せた均等色空間を作るために多くの努力が払われた。これらのうちで、いくつかのものは実用され、JIS にもとり上げられ、また、CIE においても国際的標準化の努力がなされている。

2. 色差の数値的評価

CIE 表色系は、しばしば色表示の客観的方法と考えられ、色差の数値的評価は、数学的な計算にそれらを見比べくことのできない、純粋に主観的な概念を扱うものと考えられていた。しかし、CIE 表色系も、心理物理的な実験結果を物理学的な基礎に加えて組み立てられたものであるから、主観的な要素も含まれるものであると考えなければならない。色の表示方法は、波長の関数としての異なった放射束に対する網膜の感度によって決定される要素を含むものであるから、刺激の差に対する網膜の感度によって決定される色差も、同様に確立されうる問題であろう。このためには、

- (1) 色の物理的測定およびその心理的数値評価
- (2) 心理物理的に評価された色差と、そのような色差対に対する肉眼による識別との関係

の2つの要求が満足されなければならない。色の測定器の発達と表色系の発展とは、(1)の要求を充分満足させるものであるが、(2)の要求はいまだ研究過程にあるといえる。

いま、 C_1 , C_2 , C_3 によって3つの色を表わすとしよう。それらは互いに3つの属性(色相, 明度, 彩度)において異なるものとする。もし、 C_1 と C_2 の色感覚の

差を単位の値で示すと、すなわち、 $C_1 - C_2 = 1$ とすると C_1 と C_3 , または C_2 と C_3 の色感覚の差を、 C_1 と C_2 の色感覚差に関係づけて数値的に評価することができるであろうか。すなわち、これらの試料を肉眼で比較したのち、観測者は、たとえば $C_1 - C_3 = 5$, $C_2 - C_3 = 4$ ということができるか、という問題は色差の数値的評価のひとつの重要な点である。つぎに、1人の観測者がその肉眼判定の結果、上のような数値を与えるならば、他の観測者の同様な肉眼判定の結果と、どの程度一致するか、が第二の問題である。Balinkin¹⁾は、60人の観測者の肉眼測定によって、これらの問題がある程度満足されることを報告している。

しかし、この場合に、観測条件について充分考えてみなければならない。観測条件というのは、

- (1) 視野の大きさ
- (2) 色と色との分割線
- (3) 照明光の分光分布および照度
- (4) 背景の色
- (5) 観測者の順応の状態

などである。したがって、色差の問題に関して正しく説明するためには、これらの観測条件を全部与えねばならない。A. C. Hardy²⁾も述べているように、これらのすべての観測条件に適合するような取扱いのできる色差の表示方法を見いだすことは、おそらく不可能であろう。このために、ある特別の条件のもとにおける色差の取扱い方がいろいろ研究されてきたのである。

3. 明度差の識別と均等明度スケール

3.1 輝度差の識別感度

人間がちょうど認めることのできる感覚の最小増加量を生ずるために必要な刺激の増加量を ΔJ とすると、刺激 J に対して $\Delta J/J$ は一定であるといわれている。これは、感覚における一般法則で、ウェーバーの法則という。Fechner はこの法則を視覚に応用して、

$$Q = \log J + k \quad (1)$$

"Color Difference and Uniform Color Space" by Tamotsu Fukuda
(Government Industrial Research Institute, Osaka)

図1 明暗に対する肉眼の識別感度⁹⁾

の関係をみちびいた。ここに Q は感覚量である。(1)式は、刺激の幾何級数的な増加にともなって感覚は算術級数的に増加することを意味している。これをフェヒナーの法則（またはウエーバー・フェヒナーの法則）という。しかし、感覚量を正確に測定することは困難であるから、(1)式が正しいかどうかを調べることはむずかしい。

明暗についての識別感度を問題にするときには、刺激量に輝度 L を用いると、普通の明るさにおいて $\Delta L/L$ はほぼ一定であるが、広範囲の明るさの変化に対しては必ずしも一定とはいえない。 $\Delta L/L$ をフェヒナー分数という。図1は明暗に対する肉眼の識別感度を示す図である。この図は周辺視野が暗黒の場合の光度計の小さい併置視野で得られた代表的なもので³⁾、視野の大きさ、周辺視野の明るさなどが異なると、少しちがった結果が得られる。

3.2 均等明度スケール

いま、白、黒、およびその間にあるいろいろの明るさの灰色の色票があって、これらを白から黒まで、明度差の感覚が等しくなるような段階に配列しようとするとき第一の方法は、まず、白と黒との両方から等明度差にあ

ると考えられる中間の灰色を選ぶ。つぎに、白とその中間の灰色の両方から等明度差にあると考えられる両者の中間の灰色を選ぶ。このような操作を、順次繰り返してゆくと、1つの均等明度スケール (uniform lightness scale) が得られる。この方法はマンセル色票の明度段階を作るときに用いられた。

第二の方法は、多くの白-灰色-黒の色票を準備し、まず、黒からちょうど、識別できるすこし明るい灰色を選ぶ。つまり、この黒からちょうど識別できるさらに明るい黒を選ぶ。このような操作を順次繰り返して、黒→灰色→白に至ると、非常に間隔の小さい均等明度スケールを作ることができる。

以上のような均等明度スケールについて、その明度の番号を V (黒を 0, 白を 10 とする)、色票の視感反射率を Y (普通標準の光 C を用いる) とすると、 V と Y との間に、ある関係が見いだされる。この関係は明度関数と呼ばれる。表1に種々の明度関数を掲げた。(1)式はマンセル系に最初に適用されたもので⁴⁾、白い背景の上での実験とよく一致するといわれ、中間の灰色の背景の上では(2.2)式がよいとされている⁵⁾。また、O.S.A.の測色委員会の報告⁶⁾では、さらに(2.3)式に改良され、修正マンセル系に用いられた。しかしこの式は Y から V を求める場合に不便であるので、(2.7)式、および(2.8)式の近似式が報告された^{7,8)}。この(2.8)式は、1964 CIE 均等色空間に用いられた。一方、フェヒナーの法則は Ostwald によって受けつがれ、Color Harmony Manual によって実現された。(2.5)式⁹⁾はその明度関数である。また、昭和18年に臨時日本標準規格として制定された無彩色標準色票¹⁰⁾の明度関数((2.4)式)および、ドイツ工業規格の $F\ddot{a}rbenkarte^{11)}$ における明度関数((2.6)式)も、同様な関数形である。これらの明度関数の関係は図2に示す。

3.3 明度関数と背景の影響

以上の種々の明度関数は、それぞれ異なる条件の下で観測した結果から求められたものである。とくに観測視

表1 各種の明度関数

式番号	明度関数	発表者(年号)	備考
(2.1)	$V = Y^{1/2}$	Priest-Gibson-McNicholas (1920) ⁴⁾	マンセル系(第1回)
(2.2)	$V = (1.474Y - 0.00474Y^2)^{1/2}$	Munsell-Sloan-Godlove (1933) ⁵⁾	マンセル系(第2回)
(2.3)	$Y = 1.2219V - 0.2311V^2 + 0.23951V^3$ $- 0.021009V^4 + 0.0008404V^5$	Newhall-Nickerson-Judd (1943) ⁶⁾	修正マンセル系
(2.4)	$\log_{10} Y = 1.162 + 0.1564(M-15)$ $- 0.0060(M-10)(M-20)/2$ $+ 0.0026(M-10)(M-15)(M-20)/6$	JES (1943) ¹⁰⁾	色の標準
(2.5)	$V = 5 \log_{10} Y + 0.25$	Foss (1944) ⁹⁾	オストワルド系
(2.6)	$D = 10 - 6.1723 \log_{10}(0.407Y + 1)$	Richter (1953) ¹¹⁾	DIN 系
(2.7)	$V = 2.468Y^{1/3} - 1.636$	Ladd-Pinney (1955) ⁷⁾	修正マンセル系改良
(2.8)	$W^* = 25Y^{1/3} - 17$	Wyszecki (1963) ⁸⁾	CIE 1964 均等色空間

$$D = 10 - V, \quad M = 10 + V, \quad W^* = 10V$$

図 2 各種明度関数の比較

野の周囲の明るさ、すなわち背景の明るさの影響を無視することはできない。Adams-Cobb¹²⁾は、背景の輝度を L_b としたとき、輝度 L の視野の明るさ B は、

$$B = \frac{10L}{L + L_b} \quad (3)$$

で与えられると考えた。ここで背景が明るい場合に暗黒にみえる視野を $B=0$ とし、暗い背景の場合に輝度をより以上増してもそれ以上明るくならない飽和した明るさの視野を $B=10$ とし、その間を 10 段階にとっている。図 3 は、背景輝度 L_b を種々に変えた場合、(3)式から求めた L と B との関係図である。すなわち、暗黒に順応した観測者 ($L_b=0$) は暗黒の視野 $L=0$ を除いたすべての輝度の視野が同じようにまばゆくみえる ($B=$

図 3 種々の明るさの背景に順応した観測者に対する輝度 L と明るさ B との関係

10)。これは暗室から急に明るい部屋に入った瞬間に経験することである。また、太陽の直射を受けた雪のように非常に明るい順応をうけた観測者は、白い物体と黒い物体との区別さえ困難となる。普通の明るい部屋で、白、灰、黒にみえる物体が、そのような観測者には区別できないほど暗いものにみえる。もし順応の明るさが、明度段階の白の 10 倍の輝度であるときには ($L_b=10$)、明度段階は 10 分の 1 輝度に圧縮されたようにみえる。 $L_b=0.01$, $L_b=0.20$, $L_b=1.0$ の場合は、それぞれ、黒ビロードの背景、中明度の灰色の背景、および白の背景の場合に相当する。

Judd¹³⁾は(3)式の L を視感反射率 Y に、また L_b を背景の視感反射率 Y_b におきかえるとき、白色面 ($Y=100$) が Y_b のいかににかかわらず $V=10$ となるようにすると、視感反射率 Y に対応する明度 V は、

$$V = \frac{Y(Y_b + 100)}{10(Y + Y_b)} \quad (4)$$

で与えられることを示した。図 2 の点線は、 $Y=2, 20$, および 100 のときの(4)式の関係を図示したものである。この図から、修正マンセル系(曲線 3)は、白の近くでは白の背景 ($Y_b=100$) の曲線に近似し、黒の近くでは中明度の灰色の背景 ($Y_b=20$) の曲線と近似することがわかる。これはマンセル明度関数が白の背景上で等明度段階にみえ、黒の近くでは、白背景が黒の色票の局所順応のために中明度の灰色背景の順応の場合に近似すると解することができる。

以上のように、比較する色票の背景によって明度差の識別結果が異なるので、各明度関数にはそれぞれに意味があると思われる。

4. 色差の識別感度

4.1 波長差の識別感度

光のスペクトルの色を、ちょうど見分けることのできる波長の差の識別実験は、Tyndal¹⁴⁾, Wright-Pitt¹⁵⁾, Weal¹⁶⁾, Thomson-Trezona¹⁷⁾, Bedford-Wyszecki¹⁸⁾ らによって行なわれた。図 4 は、その代表的な結果である¹⁵⁾。図に示すような視野の一方に波長 λ の単色光を入れ、他方には λ から少しずれた波長の単色光を入れ、ちょうど識別できるときの λ からの波長差 $\Delta\lambda$ を求める。

図 4 波長差の識別感度¹⁵⁾ (2° 視野)

このような実験において、 λ を変化させたときの視野の輝度が変わらないようにすることが重要である。波長 λ より長波長側および短波長側へずらせて実験したときの波長差を、それぞれ $(\Delta\lambda_+)$ および $(\Delta\lambda_-)$ とし、その平均、

$$\overline{\Delta\lambda} = \frac{(\Delta\lambda_+) + (\Delta\lambda_-)}{2}$$

を求める。このような実験を各波長について行ない、 $\Delta\lambda$ を求めてゆくと、約 460 および 530nm の波長に極大があり、約 440, 490, 590nm の波長に極小のある曲線が得られている。可視部の両端の波長では急激に識別感度が悪くなる。

以上のような結果は、視野の輝度、周辺視野の輝度、視野の大きさ、網膜上の測定位置などの変化によって変わるものと考えられている。図4は 2° の大きさの視野で網膜照度が約 70 td(トロランド) における実験結果

図5 波長差の識別感度¹⁸⁾ (1° , 2° , 1.5° 視野)

図6 波長差の識別感度¹⁸⁾ ($20'$ 視野)

である。これより小さい視野の場合は、図5および図6に示すように、小さくなるほど識別感度が悪くなる。とくに、図6の青緑の波長範囲の識別感度が悪くなるのは、微小視野による第三色覚異常の現象であるといわれている。また、図5では微小視野でも網膜照度を高くすると、その影響が比較的小さいことを示している。

4.2 純度差の識別感度

波長 λ の単色光と白色光との加法混色によって、白色光から単色光までの純度の異なる色刺激を作ることができる。視野はいつも一定の輝度を保つように工夫して、観測者はちょうど識別できる純度差を測定することができる。このような実験は、Jones-Lowry¹⁹⁾, Purdy²⁰⁾, Martin ら²¹⁾, Wright-Pitt²²⁾, Priest-Brickwedde²³⁾, Wright²⁴⁾, MacAdam²⁵⁾ によって行なわれた。図7は Martin ら²¹⁾によって得られた、波長 650nm と色温度 4800°K の白色光とを混色したときの種々の輝度純度における純度差識別感度を示すものである。中間の輝度純度において識別感度が少し低下する。すべての波長においてこのような傾向があるといわれている。

図8は白色光と単色光との間でちょうど識別できる純度の段階数を波長に対して示したもので、Martin ら²¹⁾

図7 輝度純度差の識別感度²¹⁾

図8 白色光(色温度 4800°K)と単色光との間でちょうど識別できる輝度純度の段階数¹⁹⁾²¹⁾

図 9 白色光(4800°K)からの輝度純度差識別感度²⁶⁾

および Jones-Lowry¹⁹⁾の2つの実験結果から求めた平均値を示す。570 nm 付近において識別段階数は顕著に低下し、その波長の両側は急激に高くなって、ほぼ一定の値に達する。一方、Wright²⁶⁾は、白色光に少量の単色光を加えたときの最初の純度差の識別感度を問題とし、Priest-Brickwedde²³⁾、Martin ら²¹⁾および Wright-Pitt²²⁾のデータをもとにして、図 9 のような結果を示した。この場合も、570 nm 付近において純度差の識別感度が最低であることを示している。以上の結果から、すべての波長の単色光の中で、570 nm の黄色スペクトル光が、ある意味においては最も白色光に近いスペクトル光であると考えることができる。

4.3 色度差の識別感度

Wright²⁴⁾は2つの単色光の混合比を変えて、色度差の識別域を決定し、その混合の変化量をそれに比例する短い線分で、CIE 色度図上に表わした。これは、図 10 に示すように、CIE 色度図のほとんど全域について、識別域の直線群で与えられ、その個々の線分の長さは等色

図 10 Wright の色度差識別実験の結果²⁴⁾

図 11 MacAdam の偏差長円²⁵⁾

差段階を示すものと考えられる。また、MacAdam²⁵⁾はカラーマッチングを行なう場合に、多数回 (N) の測定値の平均値、

$$x_0 = \frac{1}{N} \sum x_i, \quad y_0 = \frac{1}{N} \sum y_i$$

が最も確からしい色度座標とみなし、このときの標準偏差、

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_0)^2}{N}}, \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum (y_i - y_0)^2}{N}}$$

は識別することのできない色度範囲、すなわち色度差識別域に比例すると考えた。色度座標 x_0, y_0 を中心として、色度図上の各方向に対する標準偏差を求めると、これらの標準偏差の色度範囲は (x_0, y_0) 点を中心とする長円となる。これを偏差長円と呼ぶ。MacAdam は 25 個の色度点について実験を行ない、10 倍に拡大した偏差長円を CIE 色度図上に示した。図 11 はこの偏差長円群を示す。図 10 および図 11 からわかるように、両者の実験結果は一般によく似ていて、CIE 色度図上の色度差の均一性に欠ける点を示している。そこで以上の諸実験によく一致するような、均等色度系や均等色空間を得るための研究がなされたのである。

5. 均等色度系

5.1 UCS

色度差が均等に配置されるような色度図に変換する方法は、CIE 色度図の緑の部分を縮め、青紫の部分を伸ばすように、射影変換をすることによって行なわれた。このような均等色度系を UCS (uniform chromaticity scale) と呼ぶ。CIE 色度図上の色度座標を x, y とし、新しい UCS 色度図上の色度座標を x', y' とすると、一般につぎの射影変換の式、

表 2 各 UCS 色度図の xy 色度図からの射影変換式(5)における係数 a_{ij} の値

	Judd (1935) ²⁷⁾	MacAdam (1937) ²⁸⁾	Brekenridge-Schaub (1939) ²⁹⁾	Hunter (1941) ³⁰⁾	Farnsworth (1944) ³¹⁾	Neugebauer (1949) ³²⁾	OSA (1953) ³³⁾	杉山-福田 (1959) ³⁴⁾
a_{11}	2.7760	4.0	-0.74803	2.4266	0.6600	4.4210	0.4661	0.230
a_{12}	2.1543	0.0	-1.35203	-1.3631	0.0000	-2.5263	0.1593	0.000
a_{13}	-0.1192	0.0	0.70001	-0.3214	0.0000	-0.6316	0.0000	0.000
a_{21}	-2.9446	0.0	3.19700	0.5710	0.0000	0.6316	0.0000	0.000
a_{22}	5.0323	6.0	-1.55045	1.2447	1.2666	2.2105	0.6581	0.600
a_{23}	0.8283	0.0	-0.54884	-0.5708	0.0000	0.9473	0.0000	0.000
a_{31}	-1.0000	-2.0	1.00000	1.0000	0.0000	-2.0000	-0.1574	-0.038
a_{32}	6.3553	12.0	-7.05336	2.2633	1.0000	12.0000	1.0000	1.000
a_{33}	1.5405	3.0	-1.64023	1.1054	0.2666	3.0000	0.2424	0.163

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{a_{11}x + a_{12}y + a_{13}}{a_{31}x + a_{32}y + a_{33}} \\ y' &= \frac{a_{21}x + a_{22}y + a_{23}}{a_{31}x + a_{32}y + a_{33}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

の a_{ij} の 9 個の値を決定することが必要である。しかし (5) 式において 8 つの式が与えられると a_{ij} が決定される。このためには 4 つの色度点についての (x, y) と、 (x', y') の関係を与えればよい。普通、白色点と、他の 3 つの色度点がこのために用いられ、種々の視感実験をもとにしたデータを用いてこれらの点が得られた。現在までに多くの UCS の研究が行なわれているが、それらの変換式 (5) の各係数の値は表 2 に示すとおりである。

CIE では MacAdam の uv 座標が、その変換式が、

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}, \quad v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3} \quad (6)$$

という簡単なものであり、しかも色度感覚の均等性もかなり良好であるということから、CIE 1960 UCS として暫定的に使用することが勧告された。しかし、この色度図も完全なものではなく、いくつかの欠陥のあることが指摘されている³⁵⁾。図 12 は CIE 1960 UCS 色度図で、図中に xy 座標も示してある。

5.2 色差の NBS 単位

米国の National Bureau of Standards (NBS) では

図 12 CIE 1960 UCS 色度図

Judd の UCS²⁷⁾ と $Y^{1/2}$ の明度関数を組合せて、色差の単位を定義した。これは後に Hunter の $\alpha\beta$ 系³⁰⁾ を基礎とする色差公式、

$$\Delta E = f_e \{ 221 Y^{1/4} (\bar{\Delta}^2 + \bar{\Delta}^2) + [k \Delta(Y^{1/2})]^2 \}^{1/2} \quad (7)$$

で計算される色差の数値を用いることになった。この色差の単位を NBS 単位と呼ぶ。(7) 式において、2 色測色値を α_1, β_1, Y_1 および α_2, β_2, Y_2 とすると、各 α, β の値は x, y から、

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{2.4266x - 1.3631y - 0.3214}{1.0000x + 2.2633y + 1.1054} \\ \beta &= \frac{0.5710x + 1.2447y - 0.5708}{1.0000x + 2.2633y + 1.1054} \end{aligned}$$

の変換式で求められ、

$$\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2, \quad \Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$$

$$Y^{1/4} = \{ (Y_1 + Y_2) / 2 \}^{1/4}, \quad \Delta(Y^{1/2}) = Y_1^{1/2} - Y_2^{1/2}$$

である。また、 k は均等明度スケールとクロマティックネススケールの、それぞれの目盛の関係を示す係数であって、観測条件によって異なる値を用いる。非常に細い分割線によって 2 つの試料を分割するときは $k=12$ 、細い分割線の場合には $k=10$ または 9、比較的広い幅の分割面によって 2 つの試料を分割するときは $k=4$ または 3 を用いるとよいといわれている。 f_e は試料の光沢の影響を考慮するために入れられた係数であって、 $f_e = Y/(Y+K)$ で与えられ、 K の値は、普通の視感検査室においては 2.5 の数値を与えるといよい。

色差の NBS 単位は、いろいろの色差公式によって求められる色差の数値の基礎ともなっている。

6. 均等色空間

6.1 Adams のクロマティックバリュー空間

均等明度スケールとクロマティックネススケールとによって、均等色空間 (uniform color space) が構成される。この均等色空間内の 2 点間の距離として色度を表示することができる。このような均等色空間を作ったのは、Adams³⁵⁾ が最初である。

彼は新しい視感覚論から均等色空間を考案した。すな

わち、分光反射率 $\rho(\lambda)$ の物体に標準の光 C (分光分布 $P(\lambda)$) が入射するとき、その反射光が網膜に当たると、錐状体の視神経細胞に対して、

$$X_c = \frac{\int P(\lambda) \bar{x}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda}{\int P(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda}$$

$$Y_c = \frac{\int P(\lambda) \bar{y}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda}{\int P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}$$

$$Z_c = \frac{\int P(\lambda) \bar{z}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda}{\int P(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda}$$

で定められる X_c, Y_c, Z_c の刺激が与えられる。これらの式は、普通の三刺激値 X, Y, Z の定義、

$$X = \frac{\int P(\lambda) \bar{x}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda}{\int P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}$$

$$Y = \frac{\int P(\lambda) \bar{y}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda}{\int P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}$$

$$Z = \frac{\int P(\lambda) \bar{z}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda}{\int P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}$$

とは分母が異なる。標準の光 C に対しては、

$$\frac{\int P(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda}{\int P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} = 0.9804$$

$$\frac{\int P(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda}{\int P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} = 1.1810$$

の関係から、

$$X_c = 1.02X, Y_c = Y, Z_c = 0.8467Z$$

となる。 $\rho(\lambda) = 1$ の酸化マグネシウム面に対しては、

$$X_c = Y_c = Z_c$$

となるから、

$$X_c - Y_c = Z_c - Y_c = 0$$

で、 $X_c - Y_c, Z_c - Y_c$ を直交軸にとると、無彩色はこの座標の原点にくる。

さて、網膜上の視神経細胞に対して刺激 X_c, Y_c, Z_c が与えられると、視神経繊維にそれぞれ V_x, V_y, V_z という興奮がおこり、 $V_x - V_y, V_y, V_z - V_y$ に比例する量が脳に伝達されたと考えた。しかも、刺激量と興奮

量との関係はマンセル明度関数 ((2.3) 式) で与えられるとした。 $V_x - V_y, V_z - V_y, V_y$ を直交する 3 軸とした空間は、クロマティックバリュースペースと呼ばれ、各軸の目盛の大きさを適当にとることによって均等色空間を作ることができる。Nickerson-Stultz³⁶⁾ は、このような均等色空間内の 2 点間の距離として、色差をつぎのように定めた。

$$\Delta E = 40 \{ [\Delta(V_x - V_y)]^2 + [0.23 \Delta V_y]^2 + [0.4 \Delta(V_z - V_y)]^2 \}^{1/2} \quad (8)$$

ここで、2 色の座標を V_{x1}, V_{y1}, V_{z1} および V_{x2}, V_{y2}, V_{z2} とすると、

$$\Delta(V_x - V_y) = (V_{x1} - V_{y1}) - (V_{x2} - V_{y2})$$

$$\Delta(V_z - V_y) = (V_{z1} - V_{y1}) - (V_{z2} - V_{y2})$$

$$\Delta V_y = V_{y1} - V_{y2}$$

(8) 式は Adams-Nickerson の色差公式と呼ばれることがある。この色差式の計算には便利な数表³⁷⁾があるので工業的にも広く利用されている。

福田・藤井³⁸⁾ は、 $X \rightarrow V_x, Y \rightarrow V_y, Z \rightarrow V_z$ の変換に、(2.3) 式のかわりに、(2.8) 式を用いて、電子計算に便利のように修正した。

6.2 Cube-Root 空間

Adams のクロマティックバリュースペースは Saunderson-Milner³⁹⁾, Godlove⁴⁰⁾, Nickerson-Judd-Wyszecki⁴¹⁾, De Kleine⁴²⁾, Glasser-McKinney-Reilly-Schnelle⁴³⁾ によって修正されたが、これらのうちで Glasser らの修正して得た Cube-Root 空間が最もすぐれたものであるといわれている。この色空間における色差はつぎの式で与えられる。

$$\Delta E = \{ (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2 + (\Delta L)^2 \}^{1/2} \quad (9)$$

ここで、2 つの色の座標を a_1, b_1, L_1 および a_2, b_2, L_2 とすると、

$$\Delta a = a_1 - a_2, \Delta b = b_1 - b_2, \Delta L = L_1 - L_2$$

$$L = 25.29 G^{1/3} - 18.38$$

$$a = 106.0 (R^{1/3} - G^{1/3}), b = 42.34 (G^{1/3} - B^{1/3})$$

$$R = 1.1084X + 0.0852Y - 0.1454Z$$

$$G = -0.0010X + 1.0005Y - 0.0004Z$$

$$B = -0.0062X + 0.0394Y + 0.8192Z$$

なお、上式の $X, Y, Z \rightarrow R, G, B$ の変換式は Reilly によって修正されたものである⁴⁴⁾。Colormaster⁴⁵⁾ という光電色彩計は、上記の R, G, B の値が直読できるようなもので、この場合に (9) 式を用いると非常に便利である。

6.3 Lab 空間

Scofield⁴⁶⁾ は NBS 単位の計算式 ((7) 式) を修正してつぎの色差式を提案した。

$$\Delta E = \{ (\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2 \}^{1/2} \quad (10)$$

ここで、2つの色の座標を L_1, a_1, b_1 および L_2, a_2, b_2 とすると、

$$\Delta L = L_1 - L_2, \Delta a = a_1 - a_2, \Delta b = b_1 - b_2$$

$$L = 10Y^{1/2}$$

$$a = 7L\alpha, b = 7L\beta$$

ただし、 α, β は $\alpha\beta$ 系の色度座標である。

この式は、(7)式よりも簡単であり、 L, a, b を直交軸にとった色空間は Lab 空間と呼ばれる。

Hunter⁴⁷⁾は L, a, b を近似的に直読できる光電色彩計を作り、これを Color and Color Difference Meter と称した。この形式の光電色彩計は日本でも多数製作され光電色差計と名づけられ、工業的にかなり広範囲に用いられている。この種の装置では、 a および b は三刺激値 X, Y, Z から、

$$a = 17.5(1.02X - Y)/Y^{1/2}$$

$$b = 7.0(Y - 0.847Z)/Y^{1/2}$$

で関係づけられている。

6.4 CIE 1964 均等色空間

CIE では MacAdam の uv 色度図を UCS 色度図として用いることを勧告したが、さらにこの UCS に基礎をおいた $U^*V^*W^*$ 系を均等色空間として用いることを勧告し、これを CIE 1964 均等色空間と呼んだ。この色空間内の2点 ($U_1^*, V_1^*, W_1^*, U_2^*, V_2^*, W_2^*$) 間の距離で色差を表示する方法も同時に定められ、その色差公式を CIE 色差式と呼んだ。すなわち、

$$\Delta E = \{(\Delta U^*)^2 + (\Delta V^*)^2 + (\Delta W^*)^2\}^{1/2} \quad (11)$$

ここに、

$$\Delta U^* = U_1^* - U_2^*, \Delta V^* = V_1^* - V_2^*$$

$$\Delta W^* = W_1^* - W_2^*$$

$$W^* = 25Y^{1/3} - 17 \quad (\text{ただし, } 1 \leq Y \leq 100)$$

$$U^* = 13W^*(u - u_0)$$

$$V^* = 13W^*(v - v_0)$$

u, v は (6) 式から求められ、 u_0, v_0 は用いる標準の光の uv 色度座標である。

6.5 マンセル色空間

マンセル色空間は均等色空間であるという考えから、マンセル色空間内の2点 ($H_1V_1/C_1, H_2V_2/C_2$) 間の距離として色差を表わす方法が Nickerson⁴⁸⁾, Balinkin⁴⁹⁾ Godlove⁵⁰⁾らによって考えられた。このうちで Godlove の方法は最も合理的であるので、しばしば用いられた。彼はマンセル色空間を円筒座標と考えて、 $C=6$ において、 $1V$ ステップ $= 4C$ ステップ $\approx 11H$ ステップという関係によって、つぎの色差式を作った。

$$\Delta E = f_s \{ 2f_h C_1 C_2 [1 - \cos 3.6(\Delta H)] + (\Delta C)^2 + 16(\Delta V)^2 \}^{1/2} \quad (12)$$

ここで、 $\Delta H = H_1 - H_2, \Delta C = C_1 - C_2, \Delta V = V_1 - V_2,$

$3.6(\Delta H)$ は色相差を角度差であらわしたものである。

また、 f_h は hue-weighting factor, f_s は surround factor と呼ばれ、後に Judd⁴⁴⁾によって提案された係数である。比較する2色の平均にほぼ等しい周辺色に対しては $f_h=1$ および $f_s=3$ を用い、白から中間の灰色までの周辺色に対しては、

$$f_h = \left\{ \frac{4}{3 - \cos 3.6(\Delta H)} \right\}^2$$

$$f_s = \frac{15 + \{\bar{C}^2 + 16(\bar{V} - V_s)^2\}^{1/2}}{5 + \{\bar{C}^2 + 16(\bar{V} - V_s)^2\}^{1/2}}$$

で計算される。ここで、 $\bar{C} = (C_1 + C_2)/2, \bar{V} = (V_1 + V_2)/2$ で、 V_s は周辺色のマンセル明度である。

また、Nickerson⁴⁸⁾の退色指数 (fading index) は、

$$I = \left(\frac{C}{5} \right) (2\Delta H) + 6(\Delta V) + 3(\Delta C) \quad (13)$$

という簡単な式で計算される。この式では、 $C=5$ において、 $1V$ ステップ $= 2C$ ステップ $\approx 3H$ ステップ にとったときの色差公式であり、簡単であるにもかかわらず視感判定とよく一致するといわれている。

6.6 MacAdam の色差識別実験にもとづく均等色空間

4.3 節において述べたように、MacAdam²⁵⁾は CIE 色度図上の 25 個の色度点のまわりの色差変化に対する識別域を偏差長円で表わした。偏差長円の方程式は、長円周上の色度座標と長円中心の色度座標の差を dx, dy とすると、

$$1 = g_{11}(dx)^2 + 2g_{12}(dx)(dy) + g_{22}(dy)^2$$

で示されるから、任意の色度座標と網膜長円の中心の色度座標の差を $\Delta x, \Delta y$ とすると、その2つの色度点間の距離 ΔC は、

$$\Delta C = \{g_{11}(\Delta x)^2 + 2g_{12}(\Delta x)(\Delta y) + g_{22}(\Delta y)^2\}^{1/2}$$

で与えられ、偏差長円のその方向への半径の何倍という単位で表わすことができる。ここで、

$$g_{11} = \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2}$$

$$2g_{12} = \sin 2\theta \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right)$$

$$g_{22} = \frac{\sin^2 \theta}{a^2} + \frac{\cos^2 \theta}{b^2}$$

で与えられ、 a, b は長円の長軸および短軸の半径、 θ は長軸と x 軸とのなす角度である。MacAdam⁵¹⁾ は得られた実験結果から、25 色度点について $g_{11}, 2g_{12}, g_{22}$ の値を求め、さらにこれを補内および補外して、色度図全域の $g_{11}, 2g_{12}, g_{22}$ の値を図示したので、これらを用いることによって、

$$\frac{1}{a^2} = g_{22} + g_{12} \cot \theta$$

$$\frac{1}{b^2} = g_{11} - g_{12} \cot \theta$$

$$\tan 2\theta = \frac{2g_{12}}{g_{12} - g_{22}}$$

(ただし, $g_{12} < 0$ のとき $\theta < 90^\circ$, $g_{12} > 0$ のとき $\theta > 90^\circ$)

から, すべての色差点に対する偏差長円を描くことができる。

その後, Brown ら⁵²⁾は, 明るさをも含めた色差識別実験を行ない, 識別域を長円体であらわし, 任意の色の差 ΔE を長円体の中心からの座標の差 ($\Delta x, \Delta y, \Delta Y$) から,

$$\begin{aligned} \Delta E = \{ & g_{11}(\Delta x)^2 + 2g_{12}(\Delta x)(\Delta y) + g_{22}(\Delta y)^2 \\ & + 2g_{13}(\Delta x)(\Delta Y) + 2g_{23}(\Delta y)(\Delta Y) \\ & + g_{33}(\Delta Y)^2 \}^{1/2} \end{aligned}$$

の形で示した。この色差の表示方法は Ingle-Rudick⁵⁴⁾, Davidson-Friede⁵⁵⁾, 福田⁵⁶⁾, MacAdam⁵⁷⁾によって実用的な形にまとめられた。

一方, 長円群がすべて同一半径の円群に変換されるような色度面を作る試みが Moon-Spencer⁵⁸⁾, MacAdam⁵⁹⁾, Farnsworth⁶⁰⁾によってなされたが, 実用的な形にはならず, むしろ, 局部的に UCS を作る方法が実用化にみちびかれた。すなわち MacAdam⁵²⁾は CIE 色度図の x 軸と y 軸とを斜交させ, 両軸のはさむ角 ω を,

$$\cos \omega = \frac{g_{12}}{\sqrt{g_{11} \cdot g_{22}}}$$

とし, x 軸と y 軸の目盛の大きさの比を $\sqrt{g_{11}} : \sqrt{g_{22}}$ にとって, 局部的に長円を円に変換した。この方法は, Davidson-Hanlon⁶¹⁾ および Simon-Goodwin⁶²⁾ によって発展され, 図的色差計算方法として, かなり広く工業的に利用されるに至った。

しかし, 電子計算機を使用する場合には, 図的計算方法は不便であるので, Friele⁶³⁾, MacAdam⁶⁴⁾⁻⁶⁶⁾, Chikering⁶⁷⁾による解析の結果, 色差 ΔE はつぎの式にまとめられた。

$$\Delta E = \{ (\Delta C)^2 + (\Delta L)^2 \}^{1/2} \quad (13)$$

ここで,

$$\Delta C = K_1 \Delta C_1, \quad \Delta L = K_2 \Delta L_2$$

$$\Delta C_1 = \left\{ \left(\frac{\Delta C_{rg}}{a} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C_{yb}}{b} \right)^2 \right\}^{1/2}$$

$$\Delta L_1 = \frac{P \Delta P + Q \Delta Q}{(P^2 + Q^2)^{1/2}}$$

$$\Delta C_{rg} = \frac{Q \Delta P - P \Delta Q}{(P^2 + Q^2)^{1/2}}$$

$$\Delta C_{yb} = \frac{S \Delta L_1}{(P^2 + Q^2)^{1/2}} - \Delta S$$

$$\Delta L_2 = \frac{0.279 \Delta L_1}{a}$$

$$K_1 = 0.55669 + 0.049434Y - 0.82575 \cdot 10^{-3}Y^2 + 0.79172 \cdot 10^{-5}Y^3 - 0.30087 \cdot 10^{-7}Y^4$$

$$K_2 = 0.17548 + 0.027556Y - 0.57262 \cdot 10^{-3}Y^2 + 0.63893 \cdot 10^{-5}Y^3 - 0.26731 \cdot 10^{-7}Y^4$$

$$a^2 = \frac{17.3 \cdot 10^{-6}(P^2 + Q^2)}{1 + \frac{2.73P^2Q^2}{P^4 + Q^4}}$$

$$b^2 = 3.098 \cdot 10^{-4}(S^2 + 0.2015Y^2)$$

$$P = 0.724X + 0.382Y - 0.098Z$$

$$Q = -0.48X + 1.37Y + 0.1276Z$$

$$S = 0.686Z$$

ただし, X, Y, Z は評価されるべき差を構成する2色のいずれかに対する三刺激値で, $\Delta P, \Delta Q, \Delta S$ はこれらの2色に対する P, Q, S の差である。なお, Simon⁴⁴⁾は K_1 および K_2 の Y との関係式をつぎのように近似している。

$$K_1 = 0.054 + 0.46Y^{1/3}$$

$$K_2 = 0.465K_1 - 0.062$$

7. 色差の標準化

JIS 色の表示方法専門委員会では, 色差の表示方法の工業規格について審議し, (8)式の Adams のクロマティックバリュー空間による色差式, (10)式の Lab 空間による色差式, および(11)式の CIE 1964 均等色空間による色差式の3つを併用し, そのいずれかの方法で色差を数値的に表示する案を作成し, その審議もほぼ終りに近づいている現状である。

われわれはこれらの3色差式の相互の関係を明らかにするために, 修正マンセル系における測色値(x, y, Y)⁶⁸⁾の間の色差を計算した⁶⁸⁾。V=5 における C=6 の等クロマ線上の 2.5H ステップの色差の変化を図 13 に示す。

図 13 バリュース 5, クロマ 6 の等クロマ線上の 2.5 ヒューステップの色差

図 14 C=6 の等クロマ線上的各バリューにおける平均の色差のバリュー変化の影響

各色差式による色差の平均値は、右端に示したように、CIE, クロマティックバリュー空間, Lab の順に小さくなっているが、ヒューによる変化の傾向は、それほど明らかな相違を示さない。図 13 は $V=5$ についての結果であるが、他のバリューについてもほぼ似た傾向が示さ

れる。しかし、バリューによって色相間色差の平均値がどのように変わるかは、図 14 から明らかなように、クロマティックバリュー空間は、バリューの変化がほとんどないという点ですぐれていると考えられる。なお、他の 2 つについては低明度を除いては、ほぼ平行して明度が高くなるにつれて色差が大きくなる。また、クロマの変化による色差の変化を図 15 および図 16 に示す。図 15 には、5R, 5Y, 5G, 5B, 5P の 5 ヒューのみについて相隣る 2C ステップの色差の変化を示してある。また、各平均値を点線で示してあるが、平均の値が色相によって非常に変化することがわかり、これはそれぞれの色空間の特色を示すものといえよう。また、この場合も、クロマティックバリュー空間が、クロマの変化によってもそれほど大きな変化を示さないが、5Y については高彩度で異常な変化が見られる。図 16 は、図 15 に示したような平均値の各バリューにおける値をプロットしたものである。この図によると、彩度と同様に、クロマティックバリュー空間が明度変化による色差の変化が最も少なく

図 15 バリュー 5 における各ヒューの 2 クロマステップの色差 (各点の符号は図 13 と同じ。なお、それぞれの平均の色差を点線で示す)

図 16 各ヒューにおける2クロマステップの平均色差および10ヒュー全体の平均の色差のバリエーション変化の影響
(各点の符号は図13と同じ)

CIE が最も大きいと考えることができる。図 16 の右下の図は、10 ヒューの平均色差の明度変化との対応を示すものである。

以上の結果から、マンセル色空間を均等色空間と考えた場合には、クロマティックバリュー空間が最もよいことになるが、マンセル色空間そのものが完全な均等色空間といえない点があるので、このような点について実験的に確かめることが必要であろう。

また、CIE においても、色差の表示方法に関連して、かなり以前から討議されていたが、1960年には uv 色度図を UCS 色度図として採用し、1964年には $U^*V^*W^*$ 空間を均等空間として用いることに決定した。また同時に、(11)式を色差式として用いることを勧告した。しかし、この勧告に対していろいろの異論もあり、将来、色差の研究の結果を持ちよって、もう一度、均等色空間および色差式を考えなおそうということで、1967年のCIE

において、以下の条件で各国において実験を行なうよう勧告された。

- (1) 色差の大きさ: 0.5~2.0 CIE 単位
- (2) 視野の大きさ: 約 10°
- (3) 周辺視野: 色は灰色か白で、大きさは結果に影響を与えないほどの大きさ
- (4) 2色の分割線の視角: 0°
- (5) 照明光: 1000 lm/m^2 の昼光
- (6) 観測者: 熟練者および未熟者を含む

以上の条件による観測結果と測色的計算による色差の大きさを比較して、各色差式の優劣をチェックしようというわけである。そしてこのために、(9)式の Cube-Root 空間による色差式、(11)式の CIE 色差式、(12)式のマンセル色空間による色差式、および(13)式の Mac-Adam の色差識別域にもとづく均等色空間による色差式を対象としてとりあげた。この結果、各国において現在

色差の視感判定に関する実験が進められている。

8. む す び

以上、色差および UCS 表色系について、主として実用的な立場から解説したが、ここに記載しなかった多くの研究成果もある。ここで重要なことは、色差の研究は表面色に対する取扱いが多く、光源色に対する取扱いが少ないという点である。カラーテレビにおいて、カラー受像管上の色は、本質的には光源色であるが、画面を見る限りにおいては表面色と観測者は感ずるにちがいない。いずれのモードとして取扱うのがよいか議論のあるところであろうが、筆者は表面色として取扱うほうがよいのではないかと思う。したがって、表面色の色差を取扱う方法も、カラーテレビに関しては必ずしも無意味であるとは言えないと考える。

さて、色差の研究は、約 40 年という長い期間にわたって続けられてきて、その研究者の数も、発表論文の数も、色彩科学の分野のうちで最も多いもののひとつである。しかし、いまなお完成されていない。

このような点から、色差の研究は非常に重要なテーマのひとつであり、また一面、非常に困難な研究のひとつであると感じざるを得ない。この困難さは、観測条件の変化によって色差感覚が変わってくるという点がひとつの原因である。とくにカラーテレビという問題のみに限定した場合に、どのような方法がよいか、また、どのような視感的結果が得られるか、というふうな問題についてのデータをあまり見ない。“カラーテレビジョンにおける色差”というテーマは、視感的実験として、ひとつの興味ある、しかも非常に実用的な問題であろう。

〔参 考 文 献〕

- 1) I. H. Balinkin: Industrial Color Tolerances, *Am. J. Psychol.*, **52** (1939) 428
- 2) A. C. Hardy: Colorimetry in Industry, *J. Appl. Phys.*, **8** (1937) 233
- 3) J. Steinhardt: Intensity Discrimination in Human Eye I The Relation of $\Delta I/I$ to Intensity, *J. gen. Physiol.*, **20** (1936) 185
- 4) I. G. Priest, K. S. Gibson and H. J. McNicholas: An Examination of the Munsell Color System. I. Spectral and Total Reflection and the Munsell Scale of Value, *NBS Tech. Paper*, T 167 (1920)
- 5) A. E. O. Munsell, L. L. Sloan and I. H. Godlove: Neutral Value Scales. I. Munsell Neutral Value Scale, *JOSA*, **23** (1933) 394
- 6) S. M. Newhall, D. Nickerson and D. B. Judd: Final Report of the O. S. A. Subcommittee on the Spacing of the Munsell Colors, *JOSA*, **33** (1943) 385
- 7) J. H. Ladd and J. E. Pinney: Empirical Relationships with the Munsell Value Scale, *Proc. IRE*, **43** (1955) 1137
- 8) G. Wyszecki: Proposal for a New Color-Difference Formula, *JOSA*, **53** (1963) 1318
- 9) C. E. Foss: Analysis of the Ostwald Color System, *JOSA*, **34** (1944) 361
- 10) JES K 342 無彩色標準色票 (1943)
- 11) M. Richter: Das System der DIN-Farbenkarte, *Farbe*, **1** (1953) 85
- 12) E. Q. Adams and P. W. Cobb: The Effect on Foveal Vision of Bright (and Dark) Surroundings, *J. Exptl. Psychol.*, **5** (1922) 39
- 13) D. B. Judd: Hue, Saturation, and Lightness of Surface Colors with Chromatic Illumination, *J. Research NBS*, **24** (1940) 293, RP1285; *JOSA*, **30** (1940) 2
- 14) E. P. T. Tyndall: Chromaticity Sensitivity to Wavelength Difference as a Function of Purity, *JOSA*, **23** (1933) 15
- 15) W. D. Wright and F. H. G. Pitt: Hue Discrimination in Normal Colour Vision, *Proc. Phys. Soc. (London)*, **46** (1934) 459
- 16) R. A. Weale: Foveal Hue Discrimination in the Presence of a White Surround, *Nature*, **166** (1950) 872; Hue Discrimination in Para-Central Parts of the Human Retina Measured at Different Luminance Levels, *J. Physiol. (London)*, **113** (1951) 115; Spectral Sensitivity and Wave-Length Discrimination of the Peripheral Retina, *J. Physiol. (London)*, **119** (1953) 170
- 17) L. C. Thomson and P. W. Trezona: The Variations of Hue Discrimination with Change of Luminance Level, *J. Physiol. (London)*, **114** (1951) 98
- 18) R. E. Bedford and G. Wyszecki: Wavelength Discrimination for Point Sources, *JOSA*, **48** (1958) 129
- 19) L. A. Jones and E. M. Lowry: Retinal Sensitivity to Saturation Differences, *JOSA*, **13** (1926) 25
- 20) D. McL. Purdy: On the Saturations and Chromatic Thresholds of the Spectral Colours, *Brit. J. Psychol. (Gen. Sec.)*, **21** (1931) 283
- 21) L. C. Martin, F. L. Warburton and W. J. Morgan: Determination of the Sensitiveness of the Eye to Differences in the Saturation of Colours, *Medical Research Council. Report of the Committee upon the Physiology of Vision*, XIII, Special Report Series 188, London (1933)
- 22) W. D. Wright and F. H. G. Pitt: The Saturation-Discrimination of Two Trichromats, *Proc. Phys. Soc. (London)*, **49** (1937) 329
- 23) I. G. Priest and F. G. Brickwedde: The Minimum Perceptible Colorimetric Purity as a Function of Dominant Wavelength with Sunlight as Neutral Standard *JOSA*, **28** (1938) 133
- 24) W. D. Wright: The Sensitivity of the Eye to Small Colour Differences, *Proc. Phys. Soc. (London)*, **53** (1941) 93
- 25) D. L. MacAdam: Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight, *JOSA*, **32** (1942) 247
- 26) W. D. Wright: Researches on Normal and Defective Colour Vision, Henry Kimpton, London (1964)
- 27) D. B. Judd: A Maxwell Triangle Yielding Uniform Chromaticity Scales, *J. Research NBS*, **14** (1935) 41, RP 756; *JOSA*, **25** (1935) 24
- 28) D. L. MacAdam: Projective Transformations of I. C. I. Color Specifications, *JOSA*, **27** (1937) 294
- 29) F. C. Breckenridge and W. R. Schaub: Rectangular Uniform-Chromaticity-Scale Coordinates, *JOSA*, **29** (1939) 370
- 30) R. S. Hunter: Photoelectric Tristimulus Colorimetry from Symposium on Color—Its Specification and Use in Evaluating the Appearance of Materials, Philadelphia, American Society for Testing Materials (1941) 61
- 31) D. Farnsworth: The Farnsworth Rectilinear Uniform Chromaticity Scale Diagram, No. 38, Memorandum Rep. 44-1, Med. Research Lab. U. S. Submarine Base, New London, Conn., Apr. (1944)
- 32) H. E. J. Neugebauer: Über die farbmetrische Normung, *Z. wiss. Photogr.*, **44** (1949) 193
- 33) O. S. A. Committee on Colorimetry: The Science of Color, New York, Thomas Y. Crowell Co. (1953) 302
- 34) 杉山芳雄, 福田 保: MacAdam ellipse と Munsell Scale による UCS の相互比較, *応物*, **28** (1959) 157
- 35) E. Q. Adams: X-Z Planes in the 1931 ICI System of Colorimetry, *JOSA*, **32** (1942) 168
- 36) D. Nickerson and K. F. Stultz: Color Tolerance Specification,

- JOSA, **34** (1944) 550
- 37) D. Nickerson: Tables for Use in Computing Small Color Differences, Am. Dyestuff Reprtr. **39** (1950) 541; G. L. Buc: Further Tables for Use in Computing Small Color Differences, Am. Dyestuff Reprtr. **41** (1952) 353
 - 38) T. Fukuda and K. Fujii: A Modified Chromatic-Value System, Acta Chromatica, **1**, 4 (1965) 200
 - 39) J. L. Saunderson and B. I. Milner: Modified Chromatic Value Color Space, JOSA, **36** (1946) 36
 - 40) I. H. Godlove: New-Circular Adams Chromaticity Diagrams, JOSA, **42** (1952) 204
 - 41) D. Nickerson, D. B. Judd and G. Wyszecki: Über eine Transformation des Normvalenzsystems in ein empfindungsgemäss gleichabständiges system auf der Grundlage des Munsell-Systems, Farbe, **4** (1955) 285
 - 42) E. H. DeKleins: Quantitative Evaluation of Color Perception: An Hypothesis, JOSA, **48** (1958) 722
 - 43) L. G. Glasser, A. H. McKinney, C. D. Reilly and P. D. Schnelle: Cube-Root Color Coordinate System, JOSA, **48** (1958) 736
 - 44) G. Wyszecki: Recent Agreements Reached by the Colorimetry Committee of the CIE, JOSA, **58** (1968) 290
 - 45) L. Glasser and D. J. Troy: A New High Sensitivity Differential Colorimeter, JOSA, **42** (1952) 652
 - 46) F. Scofield: A Method for Determinations of Color Differences, Natl. Paint, Varnish, Lacquer Assoc. Scient. Sec. Circular, 664 (1943)
 - 47) R. S. Hunter: Photoelectric Color-Difference Meter, IOSA, **38**, (1948) 661; Accuracy, Precision, and Stability of a New Photoelectric Color-Difference Meter, JOSA, **38** (1948) 1094
 - 48) D. Nickerson: The specification of Color Tolerances, Textile Research, **6** (1936) 509
 - 49) I. Balinkin: Measurement and Designation of Small Color Differences, Am. Ceram. Soc. Bull., **20** (1941) 392
 - 50) I. H. Godlove: Improved Color-Difference Formula, with Applications to Perceptibility and Acceptability of Fading, JOSA, **41** (1951) 760; Perceptibility and Acceptability of Color Changes in Fastness Tests and "On-Tone" Fading, Am. Dyestuff Reprtr., **40** (1951) 549
 - 51) D. L. MacAdam: Specification of Small Chromaticity Differences, JOSA, **33** (1943) 18
 - 52) W. R. J. Brown and D. L. MacAdam: Visual Sensitivities to Combined Chromaticity and Luminance Differences, JOSA, **39** (1949) 808
 - 53) W. R. J. Brown: The Influence of Luminance Level on Visual Sensitivity to Color Differences, JOSA, **41** (1951) 684
 - 54) G. W. Ingle and L. Rudick: A Comparison of the MacAdam and Adams-Nickerson Indexes of Color Differences, JOSA, **43** (1953) 501
 - 55) H. R. Davidson and E. Friele: The Size of Acceptable Color Differences, JOSA, **43** (1953) 581
 - 56) 福田保: MacAdam 楕円体による色差表示について, 大工試季報, **6** (1955) 32
 - 57) D. L. MacAdam: Colorimetry in American Institute of Physics Handbook, McGraw-Hill (1957, 1963) 6-139
 - 58) P. Moon and D. E. Spencer: A Metric for Color Space, JOSA, **33** (1943) 18
 - 59) D. L. MacAdam: On the Geometry of Color Space, J. Franklin Institute, **238**, (1944) 195
 - 60) D. Farnsworth: A Temporal Factor in Color Discrimination, Visual Problem of Colour, II (1957) 429
 - 61) H. R. Davidson and J. J. Hanlon: Use of Charts for Rapid Calculation of Color Difference, JOSA, **45** (1965) 617
 - 62) F. T. Simon and W. J. Goodwin: Rapid Graphical Computation of Small Color Differences, Am. Dyestuff Reprtr., **47** (1958) 105
 - 63) L. F. C. Friele: Analysis of the Brown and Brown-MacAdam Colour Discrimination Data, Farbe, **10** (1961) 193; Further Analysis of Color Discrimination Data, JOSA, **55** (1965) 1314; Friele Approximations for Color Metric Coefficients, JOSA, **56** (1966) 259
 - 64) D. L. MacAdam: Analytical Approximations for Color Metric Coefficients, II. Friele Approximation, JOSA, **54** (1964) 249; III. Optimization of Parameters in Friele's Formulas, JOSA, **54** (1964) 1161; IV. Smoothed Modifications of Friele's Formulas, JOSA, **55** (1965) 91
 - 65) D. L. MacAdam: Specification of Color Differences, Acta Chromatica, **1**, 4 (1965) 147
 - 66) D. L. MacAdam: Smoothed Versions of Friele's 1965 Approximations for Color Coefficients, JOSA, **56** (1966) 1784
 - 67) K. D. Chickering: Optimization of the MacAdam-Modified 1965 Friele Color-Difference Formula, JOSA, **57** (1967) 537
 - 68) 福田保: 色差の表示方法について, 染料と薬品, **14** (1969) 286
 - 69) 森札於: 色差表示に関する E-1.3.1 (測色) の勧告, 照学誌, **52** (1968) 150

告 白 目 次

アルプス電気(株).....	広前10	芝電気測器(株).....	広前 8	日本電気(株).....	表紙 1
池上通信機(株).....	広後 4	関谷産業(株).....	広前13	日本電業工作(株).....	広前17
岩崎通信機(株).....	広前15	ソニー(株).....	広前 3	日本ビクター(株).....	広前 4, 5
(株)オーム社.....	広前22	双信電機(株).....	広前18	日本放送出版協会.....	会告中
(株)大沢商会.....	広前 6	大日日本電線(株).....	広後 2	日本無線(株).....	広前19
(株)加藤電気工業所.....	表紙 4	DX アンテナ(株).....	広後 1	伯東(株).....	広前14
キヤノン(株).....	広前 7	電気音響(株).....	広前12	(株)日立製作所.....	広前21
コズミカ光学(株).....	広前 2	東京芝浦電気(株).....	表紙 3	富士写真光機(株).....	広前 9
興和(株).....	広前16	東芝アンペックス(株).....	表紙 4	富士写真フィルム(株).....	広後 3
寿工機(株).....	広前20	日本高周波(株).....	広後 1	松下通信工業(株).....	会告裏
佐藤金属工業(株).....	広前18	日本真空光学(株).....	広前20	丸文(株).....	広前11
芝電気(株).....	表紙2・広前8	日本通信機(株).....	広前 1	リーダー電子(株).....	目次裏

本誌広告取扱店 (株) 広 和 堂 本 社 〒106 東京都港区東麻布 1-4 朗生ビル 電話東京 584-6791
 大阪営業所 〒540 大阪市東区内久宝寺町 3-15 電話大阪 762-1660
 (有)放送文化通信社 〒101 東京都千代田区神田小川町 2-3 新小川町ビル 電話東京 291-9941