

論文

マンセル色票の分光反射率分布の解析

側垣 博明*・高浜幸太郎*・納谷 嘉信**

Analysis on Spectral Reflectance Distributions of the Munsell Colors

Hiroaki Sobagaki, Kotaro Takahama and
Electrotechnical Laboratory, Osaka BranchYoshinobu Nayatani
Osaka Electro-Communication University

Abstract

Spectral reflectance distributions of Munsell colors are analyzed by using a data set of spectral reflectance distributions for about 1,600 color chips constituting the JIS Standard Colors (Glossy). Whole Munsell hues are divided into five color groups, based on the principal hues of Munsell Color System. The principal component analysis is applied to the spectral reflectance distributions of each color group, and three component functions are derived. Sum of contribution factors for the derived three component functions are above 99% in each color group. By use of the average spectral reflectance distribution and these three component functions, the spectral reflectance distributions of Munsell colors are reconstituted so as to have specified chromaticity coordinates with respect to the CIE standard illuminant C and the CIE 1931 standard observer. The reconstituted spectral reflectance distributions are well fitted to the original spectral reflectance distributions of the actual color chips. The usefulness of component functions are discussed for colorimetric computations.

1. まえがき

表面色を使用する色彩研究では、マンセル色票またはこれに近似する色紙がよく使用される。JIS Z 8721¹⁾には、表面色の表示法としてマンセル表色系²⁾が採用され、マンセル記号と CIE 標準の光 C 下の測色値 (x, y, Y) の対応を示す図表が与えられている。ところで表面色の見えに関する実験研究ならびに理論研究では、照明光は標準の光 C とは別の光源が用いられることが多く、この場合、与えられた表面色に対する三刺激値情報は、標準の光 C よりも使用光源に対するものの方が有用である。とりわけ CIE 標準の光 D₆₅ や A に対する三刺激値情報が手近にあると都合よいことが多い。

これらの三刺激値は、マンセル色票の分光反射率分布を知ることにより算定することができる。筆者らは、現実のマンセル色票の分光反射率分布を主成分分析法で解析し、そして、与えられた表面色のマンセル記号に対し

て、対応する分光反射率分布を推定する方法を展開した。本報で述べるその推定法は容易であり、現実のマンセル色票の分光反射率分布を良好に再現した。

2. 解析

解析の対象とした表面色の分光反射率分布データは、日本規格協会発行の JIS Z 8721 準拠標準色票 (光沢版)³⁾の各色票に対する測定値である。データセットの色票数は全部で 1595 色であり、各色票に対する分光反射率の値は、400 nm から 700 nm の範囲で 10 nm ごとの波長点 (計 31 点) で与えられている。全色票のうち、26 色が無彩色で、1569 色が有彩色であった。無彩色色票に対する分光反射率分布は、いずれも全く平坦といつてよい特性を有していた。それで無彩色色票に対しては、指定された刺激値 Y に対して各波長の反射率値が $Y/100$ の平坦な分光反射率分布と指定できるので特に問題はない。我々の関心は有彩色色票に対する分光反射率分布の振舞いを知ることであり、それで解析には無彩色色票を除く 1569 色を実際の対象とした。これら有彩色

* 電子技術総合研究所 大阪支所

** 大阪電気通信大学

色票は、色相については40種で、2から9までのマンセル明度、1から14までのマンセルクロマにわたっている*。

Fig. 1はマンセル明度6で、10種の色相と2種のクロマ(4と8)について色票の分光反射率分布を示している。分光反射率分布は期待されるように色相の変化とともに、ピーク波長が変化し、クロマとともに振幅が変化していることがうかがえる。Fig. 2はマンセル明度5に対する種々の色票の分光反射率分布のデータを用いて計算した標準の光CとCIE測色標準観測者に関する u' , v' 色度座標を示す。Fig. 3はFig. 2に示す各色票に付けられたマンセル記号に対して、JIS¹⁾の規定に対応する x , y 色度座標を u' , v' 色度座標に変換してプロットしたものである。現実の標準色票の分光反射率分布から求めた測色値(Fig. 2)はおおむねJISの規定(Fig. 3)に良好に沿ってはいるものの、詳細には不規則的な不一致が認められる。このため、現実の色票の分光反射率分布値の直接使用によっては、種々の光源に対しFig. 3に示されるような滑らかな形状の標準的な測色座標のグリッドを得ることはできない。

種々の光源に対して、滑らかな形状の測色座標のグリッドを得るための方法として、現実のマンセル色票の分光反射率分布をもとに、これを標準の光C下で規定の測色座標をとるように補正した分光反射率分布を用いることが考えられる。実際筆者らは、変分法による補正

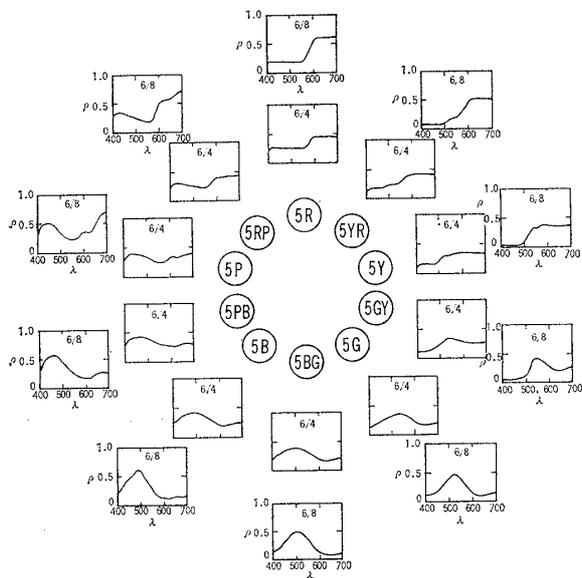


Fig. 1 マンセル明度6で10種類の色相と2種類のクロマ(4と8)の現実の色票に対する分光反射率分布——外側の曲線は彩度8, 内側の曲線は彩度4に対する色票の分光反射率分布を示す

* 使用したマンセル色票の色範囲の詳細は JIS 標準色票³⁾を参照するとよい。また同色票に付随する解説書には、標準色票の測定方法、使用方法等が記されている。色票の色範囲は、本報の Fig. 7 の参照によっても把握できる。

法⁴⁾を用いて上記の補正を行い、標準の光C下でJIS規定の測色座標を与える分光反射率分布のセットを得た。文献(5)の図4は修正分光反射率分布のセットを用いて計算した標準の光A下におけるマンセル色票の測色値のグリッドを示している。種々の光源に対するマンセル色票の測色値は、それら修正分光反射率分布を用いて推定できる。しかしながら、そのデータ数は全く膨大であり、このようなデータセットを用いる推定法は実用的でない。

そこで筆者らは、分光反射率分布の実用的な推定法を得るため、色票の分光反射率分布の元データに主成分分

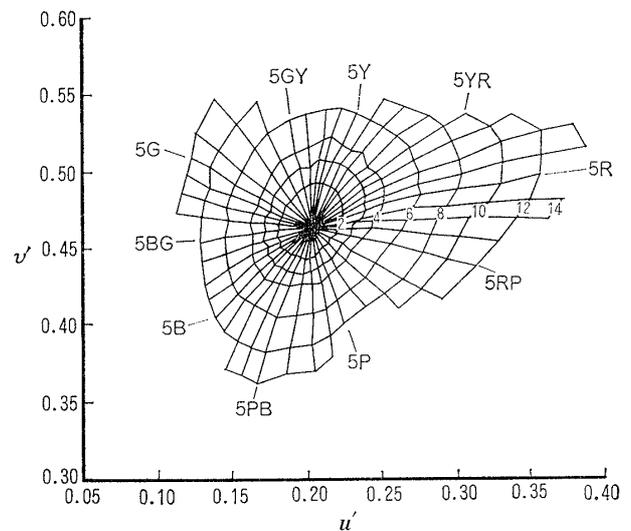


Fig. 2 マンセル明度5の現実の色票に対する分光反射率の測定値を用いて計算された各色票の標準の光CおよびCIE測色標準観測者に関する u' , v' 色度のグリッド

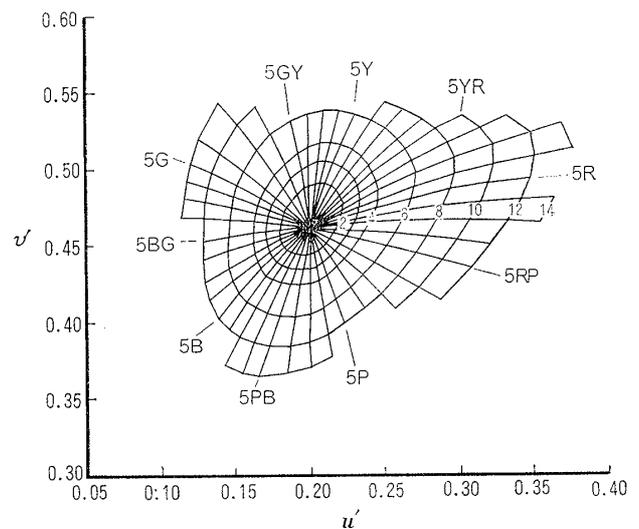


Fig. 3 Fig. 2 と同一マンセル記号に対して JIS¹⁾により規定されている x , y 色度を u' , v' 色度に変換してプロットしたグリッド

析を適用して解析を行なった。主成分分析は、すでに蛍光や蛍光灯の分光分布のデータ解析に適用され、それらの分光分布が少数の成分に分解できることが示されている^{6,7)}。さらにそれらの成分を用いて所定の測色値を有する光の分光分布の合成法が展開されている^{6,8)}。

主成分分析による分光反射率分布の分解を簡単に記述する。 N 個の分光反射率分布のデータがあり、それらを $\rho_n(\lambda_i)$, ($n=1, 2, \dots, N$) と記す。ここで i は 1 から 31 にわたり, $\lambda_1=400, \lambda_2=410, \dots, \lambda_{31}=700\text{nm}$ を表わす。また $N \geq 31$ とする。これら $\rho_n(\lambda_i)$ の値に対して、次式により分散共分散行列 $\mathbf{V}=(V_{ij})$ を求める。

$$V_{ij} = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N [\rho_n(\lambda_i) - R_0(\lambda_i)][\rho_n(\lambda_j) - R_0(\lambda_j)]$$

$$(i, j=1, 2, \dots, 31) \quad (1)$$

ここで、 $R_0(\lambda_i)$ は $\rho_n(\lambda_i)$ の平均値であり

$$R_0(\lambda_i) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \rho_n(\lambda_i) \quad (2)$$

で与えられる。行列 \mathbf{V} は 31 行 31 列の対称行列であり、これに対して 31 個の固有ベクトルが存在する。それらを \mathbf{R}_α ($\alpha=1, 2, \dots, 31$) と記せば、定義により次式を満足する。

$$\mathbf{V}\mathbf{R}_\alpha = \mu_\alpha \mathbf{R}_\alpha \quad (\alpha=1, 2, \dots, 31) \quad (3)$$

(3)式において μ_α は固有ベクトル \mathbf{R}_α に対する固有値である。 μ_α および \mathbf{R}_α の値は、たとえばヤコビ法による数値計算法で求めることができ、 $\mu_1 \geq \mu_2 \geq \dots \geq \mu_{31}$ の順に並べられているとする。そのとき、分光反射率 $\rho(\lambda_i)$ は \mathbf{R}_α を用いて次のように展開することができる。

$$\rho(\lambda_i) = R_0(\lambda_i) + \sum_{\alpha=1}^{31} k_\alpha R_\alpha(\lambda_i) \quad (4)$$

ここで $R_\alpha(\lambda_i)$ はベクトル \mathbf{R}_α の i 番目の要素を表わす。 k_α は $R_\alpha(\lambda_i)$ の係数である。展開式 (4) における第 α 次の項の寄与の大きさは寄与率と呼ばれる次の量で評価される。

$$f_\alpha = \mu_\alpha / \sum_{\alpha=1}^{31} \mu_\alpha \quad (5)$$

さて、(4)式において寄与率の小さい高次の項を無視することにより、 $\rho(\lambda)$ は次式により近似的に表わされる。

$$\rho(\lambda) \approx R_0(\lambda) + \sum_{\alpha=1}^{\beta} k_\alpha R_\alpha(\lambda) \quad (6)$$

ここで β は考慮した成分の最高次数である。なお (6)式において、 λ の添字 i は省略した。 $R_\alpha(\lambda)$ を本報では成分反射率分布と呼ぶこととする。(6)式の近似の度合いは、累積寄与率と呼ばれる量 $\sum_{\alpha=1}^{\beta} f_\alpha$ でもって評価される。

さて、色票の分光反射率データの解析にあたって、主

成分分析は、全色票に対するデータを一括しては適用せず、あらかじめデータを分光反射率分布の形状が類似した群にわけて、各群ごとに主成分分析を適用することとした。これは全色範囲に対し多様に变化する分光反射率分布を少数の成分には分解できないだろうと思われたからである。そこで、色票を 5 種のマンセル主色相に対応して、五つの群 R, Y, G, B, P にわけた。各群は 5R, 5Y, 5G, 5B, 5P などのマンセル主色相を中心とし、両側に 12.5 単位のマンセル色相ステップの範囲を有し、2.5 ステップごとにマンセル色相をとって計 11 種の色相から成る。Fig.4 は各色票群の色相範囲を示している。図に示されているように、隣り合う群の間には重複領域が設けられており、この領域に入る色票は二つの群に含まれる。例えば、色相 5YR の色票は群 R と群 Y の両方に含まれる。重複領域の設定は、後で述べるように、各色票群で導出される成分反射率分布を用いて合成される分光反射率分布が、異なる色票群をまたぐ色相変化に対して不連続的に变化することを避けるための準備である。Table 1 は各色票群の色相範囲と含まれる色票数を示している。

Table 1 の各群ごとに含まれている色票の分光反射率分布データに主成分分析を行なった。各群に対して計算された最初の三つの成分に対する寄与率の値を Table 2 に示す。Table 2 の第 5 列目には、最初の 3 成分をとったときの累積寄与率が示されている。その値は、各群とも 99% 以上にも達しており、これから各群における色票の分光反射率分布は次式で良好な近似で分解するこ

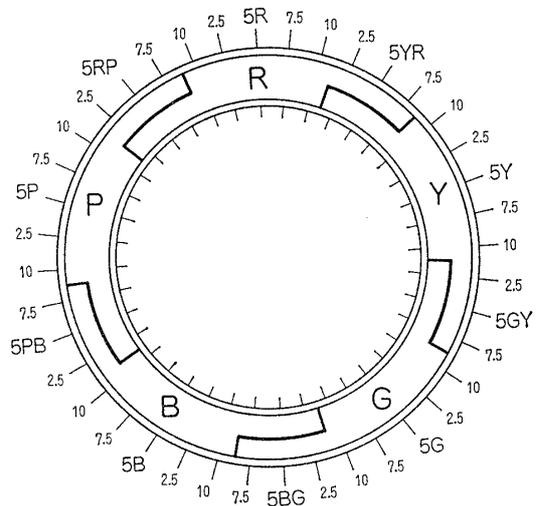


Fig.4 色群と色相範囲

Table 1 五つの色群の色相範囲と色票数

色群	色相範囲	色票数
R	2.5RP~5R~7.5YR	461
Y	2.5YR~5Y~7.5GY	413
G	2.5GY~5G~7.5BG	419
B	2.5BG~5B~7.5PB	410
P	2.5PB~5P~7.5RP	427

Table 2 各色群で導出された成分の寄与率

色群	各成分の寄与率(%)			累積寄与率(%)
	R ₁	R ₂	R ₃	
R	85.3	12.2	2.0	99.5
Y	87.6	9.3	2.9	99.8
G	91.8	5.5	2.3	99.6
B	94.3	3.8	1.7	99.8
P	90.9	6.9	1.7	99.5

とができる。

$$\rho(\lambda) = R_0(\lambda) + \sum_{\alpha=1}^3 k_{\alpha} R_{\alpha}(\lambda) \quad (7)$$

Table 3 から **Table 7** は色票群に対して計算された平均分光反射率分布 $R_0(\lambda)$ と成分反射率分布 $R_{\alpha}(\lambda)$ ($\alpha=1, 2, 3$) の値を示している。**Fig. 5** は色票群 R に対する $R_0(\lambda)$ と $R_{\alpha}(\lambda)$ ($\alpha=1, 2, 3$) を図示している。

3. 分光反射率分布の合成

分光反射率分布を定めたいマンセル色票の三刺激値が与えられたとき、(7)式を用いて対応する分光反射率分

布を与えることができる。この実行において、そのマンセル色票がその色相名に応じて単一の色票群に属する場合と、二つの色票群に属する場合がある。それぞれの場合について分光反射率分布の合成法を述べる。

3.1. ケース 1 : 単一の色票群に属する場合

この場合、所属する色票群に対する $R_0(\lambda)$ と $R_{\alpha}(\lambda)$ ($\alpha=1, 2, 3$) を用いる。例えば、色相が 10RP であれば **Table 3** の値を用いる。分光反射率分布が $\rho(\lambda)$ の色票の標準の光 C と CIE 測色標準観測者に関する三刺激値を X, Y, Z と記せば、それらは(7)式を用いて次のように書き表わすことができる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + \sum_{\alpha=1}^3 k_{\alpha} \begin{pmatrix} X_{\alpha} \\ Y_{\alpha} \\ Z_{\alpha} \end{pmatrix} \quad (8)$$

ここで、 (X_0, Y_0, Z_0) および $(X_{\alpha}, Y_{\alpha}, Z_{\alpha})$ は次式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} = \sum_{\lambda} S_C(\lambda) R_0(\lambda) \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} d\lambda \quad (9)$$

Table 3 色群 R で得られた平均反射率分布 R_0 と三つの成分反射率分布 R_1, R_2, R_3

波長	R ₀	R ₁	R ₂	R ₃
400	0.1661	0.0823	0.0897	0.1546
10	0.2136	0.1344	0.1616	0.2168
20	0.2237	0.1499	0.1862	0.2266
30	0.2236	0.1517	0.1904	0.2204
40	0.2228	0.1521	0.1918	0.2104
450	0.2219	0.1523	0.1930	0.1991
60	0.2199	0.1521	0.1939	0.1821
70	0.2172	0.1519	0.1951	0.1562
80	0.2141	0.1515	0.1958	0.1232
90	0.2115	0.1511	0.1960	0.0824
500	0.2105	0.1511	0.1936	0.0305
10	0.2111	0.1520	0.1865	-0.0350
20	0.2120	0.1532	0.1767	-0.1023
30	0.2126	0.1538	0.1710	-0.1432
40	0.2139	0.1544	0.1667	-0.1724
550	0.2194	0.1567	0.1579	-0.2165
60	0.2337	0.1624	0.1406	-0.2893
70	0.2655	0.1747	0.1093	-0.3664
80	0.3134	0.1904	0.0555	-0.3712
90	0.3598	0.2026	-0.0218	-0.2917
600	0.3914	0.2093	-0.0963	-0.1795
10	0.4082	0.2128	-0.1489	-0.0860
20	0.4162	0.2154	-0.1807	-0.0304
30	0.4199	0.2168	-0.1975	0.0020
40	0.4231	0.2178	-0.2076	0.0319
650	0.4259	0.2182	-0.2144	0.0603
60	0.4286	0.2185	-0.2199	0.0862
70	0.4297	0.2179	-0.2233	0.1060
80	0.4307	0.2179	-0.2263	0.1200
90	0.4317	0.2183	-0.2291	0.1313
700	0.4325	0.2187	-0.2319	0.1405

Table 4 色群 Y で得られた平均反射率分布 R_0 と三つの成分反射率分布 R_1, R_2, R_3

波長	R ₀	R ₁	R ₂	R ₃
400	0.1294	0.0682	0.1235	-0.1311
10	0.1602	0.1011	0.1900	-0.2054
20	0.1678	0.1100	0.2095	-0.2195
30	0.1712	0.1128	0.2154	-0.2127
40	0.1752	0.1156	0.2204	-0.2022
450	0.1803	0.1188	0.2259	-0.1884
60	0.1863	0.1223	0.2315	-0.1687
70	0.1936	0.1266	0.2379	-0.1445
80	0.2021	0.1313	0.2432	-0.1159
90	0.2145	0.1374	0.2473	-0.0804
500	0.2360	0.1471	0.2479	-0.0185
10	0.2701	0.1609	0.2327	0.0908
20	0.3073	0.1755	0.1903	0.2362
30	0.3288	0.1847	0.1490	0.3366
40	0.3390	0.1898	0.1202	0.3730
550	0.3476	0.1936	0.0919	0.3598
60	0.3598	0.1979	0.0512	0.3066
70	0.3769	0.2035	-0.0064	0.2212
80	0.3902	0.2079	-0.0651	0.1273
90	0.3962	0.2107	-0.1119	0.0431
600	0.3956	0.2119	-0.1415	-0.0248
10	0.3923	0.2124	-0.1579	-0.0727
20	0.3901	0.2132	-0.1669	-0.1000
30	0.3889	0.2140	-0.1715	-0.1124
40	0.3880	0.2149	-0.1741	-0.1190
650	0.3870	0.2153	-0.1757	-0.1218
60	0.3877	0.2163	-0.1757	-0.1153
70	0.3888	0.2169	-0.1737	-0.0981
80	0.3905	0.2179	-0.1718	-0.0810
90	0.3923	0.2191	-0.1703	-0.0658
700	0.3933	0.2201	-0.1698	-0.0557

Table 5 色群 G で得られた平均反射率分布 R_0 と三つの成分反射率分布 R_1, R_2, R_3

波長	R ₀	R ₁	R ₂	R ₃
400	0.1418	0.0868	0.1008	0.1219
10	0.1808	0.1318	0.1530	0.2202
20	0.1945	0.1463	0.1751	0.2436
30	0.2029	0.1517	0.1875	0.2356
40	0.2122	0.1567	0.1992	0.2198
450	0.2236	0.1624	0.2132	0.1960
60	0.2378	0.1685	0.2327	0.1590
70	0.2549	0.1749	0.2571	0.1076
80	0.2708	0.1807	0.2722	0.0496
90	0.2867	0.1865	0.2715	-0.0123
500	0.3057	0.1938	0.2427	-0.0958
10	0.3281	0.2019	0.1843	-0.2148
20	0.3440	0.2085	0.1099	-0.3275
30	0.3455	0.2119	0.0527	-0.3638
40	0.3375	0.2128	0.0101	-0.3402
550	0.3238	0.2118	-0.0299	-0.2837
60	0.3073	0.2090	-0.0666	-0.2166
70	0.2901	0.2052	-0.1002	-0.1461
80	0.2717	0.2000	-0.1286	-0.0754
90	0.2508	0.1927	-0.1534	-0.0051
600	0.2286	0.1835	-0.1736	0.0573
10	0.2108	0.1752	-0.1852	0.0978
20	0.2005	0.1703	-0.1906	0.1181
30	0.1958	0.1682	-0.1923	0.1268
40	0.1933	0.1673	-0.1930	0.1318
650	0.1917	0.1668	-0.1932	0.1337
60	0.1944	0.1638	-0.1926	0.1289
70	0.2008	0.1727	-0.1895	0.1157
80	0.2082	0.1770	-0.1851	0.0995
90	0.2145	0.1809	-0.1816	0.0838
700	0.2190	0.1838	-0.1778	0.0737

Table 6 色群 B で得られた平均
反射率分布 R_0 と三つの成分反射率
分布 R_1, R_2, R_3

波長	R_0	R_1	R_2	R_3
400	0.1933	0.0925	-0.0366	-0.1440
10	0.2662	0.1610	-0.0318	-0.2399
20	0.2911	0.1864	-0.0370	-0.2661
30	0.3005	0.1911	-0.0659	-0.2676
40	0.3086	0.1933	-0.1007	-0.2628
450	0.3177	0.1951	-0.1454	-0.2512
60	0.3259	0.1964	-0.1919	-0.2079
70	0.3340	0.1973	-0.2409	-0.1403
80	0.3378	0.1977	-0.2731	-0.0637
90	0.3363	0.1980	-0.2819	0.0242
500	0.3304	0.1981	-0.2686	0.1030
10	0.3216	0.1980	-0.2394	0.1686
20	0.3083	0.1969	-0.1941	0.2296
30	0.2936	0.1951	-0.1393	0.2665
40	0.2786	0.1925	-0.0785	0.2748
550	0.2612	0.1884	-0.0130	0.2721
60	0.2419	0.1823	0.0455	0.2710
70	0.2259	0.1765	0.0924	0.2533
80	0.2154	0.1729	0.1285	0.2092
90	0.2070	0.1697	0.1605	0.1476
600	0.1981	0.1661	0.1897	0.0855
10	0.1907	0.1629	0.2090	0.0398
20	0.1876	0.1618	0.2168	0.0092
30	0.1892	0.1632	0.2171	-0.0213
40	0.1935	0.1658	0.2162	-0.0625
650	0.1979	0.1681	0.2152	-0.1032
60	0.2024	0.1704	0.2117	-0.1235
70	0.2056	0.1720	0.2044	-0.1130
80	0.2063	0.1727	0.1993	-0.0818
90	0.2070	0.1737	0.1946	-0.0535
700	0.2102	0.1757	0.1870	-0.0498

Table 7 色群 P で得られた平均
反射率分布 R_0 と三つの成分反射率
分布 R_1, R_2, R_3

波長	R_0	R_1	R_2	R_3
400	0.2179	0.0847	0.0377	-0.1405
10	0.2974	0.1530	0.1000	-0.1893
20	0.3194	0.1771	0.1331	-0.1996
30	0.3228	0.1801	0.1481	-0.2129
40	0.3234	0.1807	0.1606	-0.2198
450	0.3225	0.1809	0.1730	-0.2195
60	0.3180	0.1805	0.1827	-0.1998
70	0.3106	0.1800	0.1929	-0.1654
80	0.3002	0.1789	0.2004	-0.1151
90	0.2861	0.1772	0.1996	-0.0450
500	0.2717	0.1748	0.1948	0.0201
10	0.2582	0.1720	0.1888	0.0734
20	0.2437	0.1685	0.1776	0.1319
30	0.2334	0.1662	0.1656	0.1750
40	0.2278	0.1649	0.1570	0.1948
550	0.2229	0.1637	0.1465	0.2092
60	0.2176	0.1622	0.1270	0.2377
70	0.2228	0.1653	0.0913	0.2677
80	0.2436	0.1742	0.0240	0.2756
90	0.2680	0.1831	-0.0615	0.2418
600	0.2848	0.1883	-0.1345	0.1895
10	0.2908	0.1906	-0.1796	0.1603
20	0.2900	0.1915	-0.1978	0.1595
30	0.2920	0.1929	-0.2026	0.1438
40	0.3013	0.1957	-0.2058	0.0955
650	0.3142	0.1984	-0.2114	0.0227
60	0.3269	0.2005	-0.2221	-0.0582
70	0.3358	0.2007	-0.2366	-0.1295
80	0.3409	0.2003	-0.2541	-0.1786
90	0.3447	0.2001	-0.2690	-0.2174
700	0.3490	0.2004	-0.2746	-0.2559

$$\begin{pmatrix} X_\alpha \\ Y_\alpha \\ Z_\alpha \end{pmatrix} = \sum_{\lambda} S_C(\lambda) R_\alpha(\lambda) \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} \Delta\lambda \quad (10)$$

$$(\alpha=1, 2, 3)$$

なお、 $S_C(\lambda)$ は標準の光 C の分光分布で、次式で基準化されているとする。

$$\sum_{\lambda} S_C(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda = 100 \quad (11)$$

(8) 式は k_1, k_2, k_3 に対する 3 元連立一次方程式である。 (X_0, Y_0, Z_0) および $(X_\alpha, Y_\alpha, Z_\alpha)$ は **Table 3** から **Table 7** に与えられている $R_0(\lambda)$ と $R_\alpha(\lambda)$ を用いることにより値を求めることができるので、未知数 k_α ($\alpha=1, 2, 3$) は X, Y, Z の値が与えられると一義的に求めることができる。各色票群に対して、 X, Y, Z から k_1, k_2, k_3 を求める方程式を以下に示す。

群 R に対して、

$$\begin{aligned} k_1 &= 0.078124X - 0.034579Y + 0.009536Z - 1.7481 \\ k_2 &= -0.093052X + 0.078249Y + 0.019305Z + 0.2726 \quad (12a) \\ k_3 &= 0.034517X - 0.056065Y + 0.019106Z - 0.0413 \end{aligned}$$

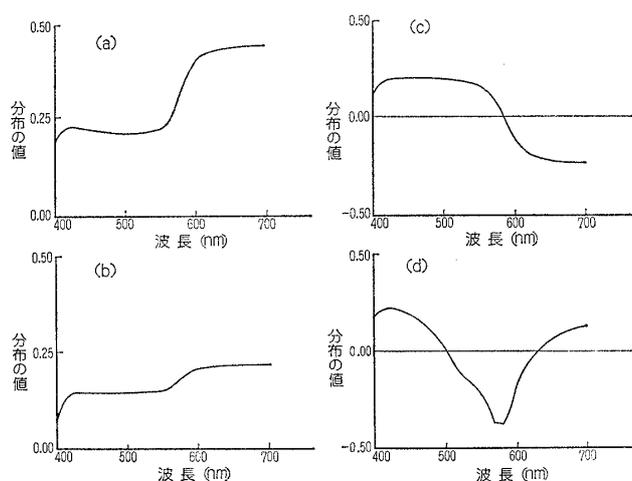


Fig. 5 色票群 R に対して計算された、(a) 平均分光
反射率分布と (b) 第 1 次、(c) 第 2 次、(d) 第 3 次
成分反射率分布

群 Y に対して,

$$\begin{aligned} k_1 &= 0.050847X + 0.000033Y + 0.003760Z - 1.7851 \\ k_2 &= -0.060138X + 0.038222Y + 0.026867Z + 0.1023 \\ k_3 &= -0.045681X + 0.053380Y - 0.011884Z - 0.0451 \end{aligned} \quad (12b)$$

群 G に対して,

$$\begin{aligned} k_1 &= 0.029939X + 0.014495Y + 0.008916Z - 1.3832 \\ k_2 &= -0.059037X + 0.027080Y + 0.026775Z - 0.1097 \\ k_3 &= 0.053083X - 0.055469Y + 0.007530Z + 0.1240 \end{aligned} \quad (12c)$$

群 B に対して,

$$\begin{aligned} k_1 &= 0.031660X + 0.007994Y + 0.013446Z - 1.4325 \\ k_2 &= 0.078292X - 0.048371Y - 0.020379Z + 0.1954 \\ k_3 &= -0.034525X + 0.049961Y - 0.013864Z + 0.0438 \end{aligned} \quad (12d)$$

群 P に対して,

$$\begin{aligned} k_1 &= 0.067123X - 0.026836Y + 0.013064Z - 1.6252 \\ k_2 &= -0.099258X + 0.082649Y + 0.015444Z + 0.0404 \\ k_3 &= -0.028956X + 0.053579Y - 0.019677Z + 0.1656 \end{aligned} \quad (12e)$$

こうして、所定の三刺激値を有する色票の分光反射率分布は、(12)式で計算される k_1, k_2, k_3 の値と、Table 3 から Table 7 で所属する色票群に対応する表からの $R_0(\lambda)$ と $R_a(\lambda)$ を (7)式に用いることにより、求めることができる。

3.2. ケース 2: 二つの色票群に含まれる場合

Fig. 4 に示されているように、色相記号が複合色相名で、その色相名の前のステップ値が 2.5 または 5, 7.5 の場合、その色票は二つの色票群に属する。たとえば、7.5YR の色票は色票群 R と色票群 Y の両方に属する。このような共通領域にある色票の色相名は nF_1F_2 で構成される。ここで、 n は 2.5 または 5, 7.5 の値である。 F_1 は Y または G, B, P, R であり、 F_2 は F_1 のそれら記号に対応して、R または Y, G, B, P の記号である。色相名 nF_1F_2 の色票は、色票群 F_1 と色票群 F_2 の両方に属する。この色票に対する標準の光 C 下の三刺激値が与えられると、ケース 1 で記述した合成法を用いて二つの色票群のそれぞれについて合成分光反射率分布を得る。これらを $\rho_{F_1}(\lambda)$ および $\rho_{F_2}(\lambda)$ と記述する。そのとき、考察下の色票の分光反射率分布を次式により $\rho_{F_1}(\lambda)$ と $\rho_{F_2}(\lambda)$ の重みつき平均で定める。

$$\rho(\lambda) = \frac{n}{10}\rho_{F_1}(\lambda) + \left(1 - \frac{n}{10}\right)\rho_{F_2}(\lambda) \quad (13)$$

たとえば、群 R と Y 群の両方に属する 3 種の色相 2.5YR, 5YR, 7.5YR についていえば、2.5YR では

$$\rho(\lambda) = 0.25\rho_Y(\lambda) + 0.75\rho_R(\lambda),$$

5YR では

$$\rho(\lambda) = 0.5\rho_Y(\lambda) + 0.5\rho_R(\lambda),$$

7.5YR では

$$\rho(\lambda) = 0.75\rho_Y(\lambda) + 0.25\rho_R(\lambda)$$

のように $\rho(\lambda)$ が合成される。これらの式から判るように共通領域の色相に対して、より近い側の主要マンセル色相に対応する群に、より高い重みが与えられる。この

ような重みつき平均の採用は、異なる色票群間をまたぐ色相変化に対して分光反射率分布の不連続的变化が生じないようにするためである。

4. 検討

前節では成分反射率分布によるマンセル色票の分光反射率分布の合成法を述べた。この節では、そのようにして合成される分光反射率分布が合理的な結果を与えるかどうかについて、いくつか検討した点を述べる。

4.1. 現実の色票の分光反射率分布に対する再現性

Table 3 から Table 7 に与えられている成分反射率分布は現実のマンセル色票の分光反射率分布に対する解析から求めたものである。それらの有効性を確かめるため、前節の方法で合成される分光反射率分布が元の色票の分光反射率分布をいかに再現するかを調べた。これは次の手順で行なった。

解析のもととしたマンセル色票の分光反射率分布を用いて、標準の光 C と CIE 測色標準観測者に関する三刺激値を計算した。次に、この三刺激値を用いて、前節の手順で分光反射率分布を合成した。そして元の分光反射率分布と合成分光反射率分布を比較した。

この比較は、解析に用いた全色票について行なった。元の分光反射率分布と合成分光反射率分布の比較の例を Fig. 6 に示す。Fig. 6 上図は一致の良好な例であり、大部分の色票について合成分光反射率分布は、この程度に元の分光反射率分布に一致した。Fig. 6 下図は両分布間の外れが比較的大きかった例を示す。Fig. 6 下図において合成曲線の方が期待されるように滑らかな形状を示している。

ある一部の高彩度色において、合成分光反射率がある波長で 1 を越えたり、あるいは負になり、物体色条件 $0 \leq \rho(\lambda) \leq 1$ を満足しないものが生じた。しかしそれらは少数 (6 色) であり、しかもそれらの逸脱の程度は僅かであった。

これらの結果から、合成分光反射率分布は元の分光反射率分布を良好に再現することが確認された。

4.2. 各種光源における色度座標の系統性

既述のように、マンセル色票について JIS¹⁾ に規定されている測色座標を用いて、マンセル色票の分光反射率分布を合成することができる。それらの分光反射率分布と、標準の光 C および CIE 測色標準観測者について求めた色度座標は、当然のことながら JIS¹⁾ 規定の値に一致し、Fig. 3 に示すような滑らかな形状の色度座標のグリッドを与えた。

さて、それら分光反射率分布が有効であるためには、そのような滑らかな形状のグリッドが標準の光 C とは別の任意な光源についても得られることが望まれる。そこで、筆者らは各種光源について、標準の光 C 下で規

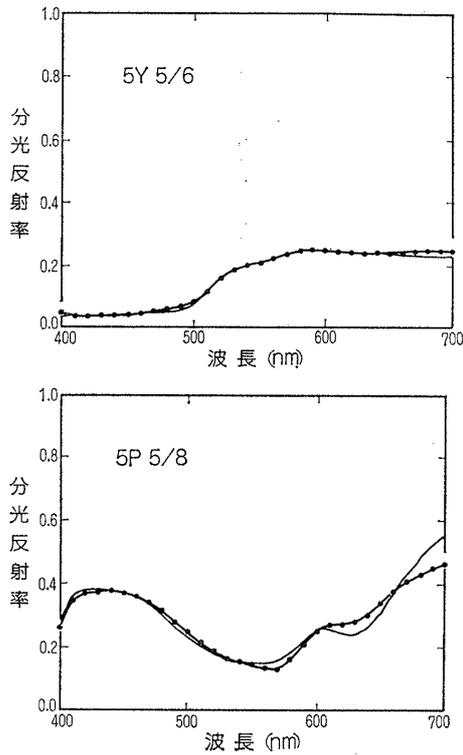


Fig.6 色票の元の分光反射率分布と合成分光反射率分布の比較——图中、実線は JIS 標準色票³⁾の分光反射率分布、●印付き実線は合成分光反射率分布を示す——上図は 5Y5/6 に対する結果で、両分布の一致が良好な例、下図は 5P5/8 に対する結果で、両分布間の外れが大きかった例を示す

定の測色値をとるよう合成された分光反射率分布を用いて色度座標のグリッドを求めた。テストした光源は 10 種で、それらは標準の光 D_{55} , D_{65} , D_{75} , A, B, 相関色温度が 4200 K (白色), 6500 K (昼光色) の普通形蛍光ランプ, 相関色温度が 20000 K (青白色) の蛍光ランプ, 相関色温度が 5000 K の 3 波長域発光形蛍光ランプ, 並びに Thornton⁹⁾ によるメタメリズム検出用の蛍光ランプである。

Fig.7 は各種マンセル明度に対するマンセル色票の標準の光 D_{65} における色度座標を合成分光反射率分布を用いて計算した結果を示す。いずれの明度についても滑らかな形状のグリッドが得られている。**Fig.8** はマンセル明度 5 について求めた標準の光 A における同様な色度座標のグリッドを示している。グリッドの滑らかさは良好であり、分光反射率分布の調整による結果 (文献 (5) の図 4) に比べてより良好な結果を与えている。テストした他のいずれの光源についても十分に滑らかな色度座標のグリッドが得られた。これらの結果は、上述の方法で合成される分光反射率分布がマンセル記号の変化に対して系統的に変化することを示唆している。

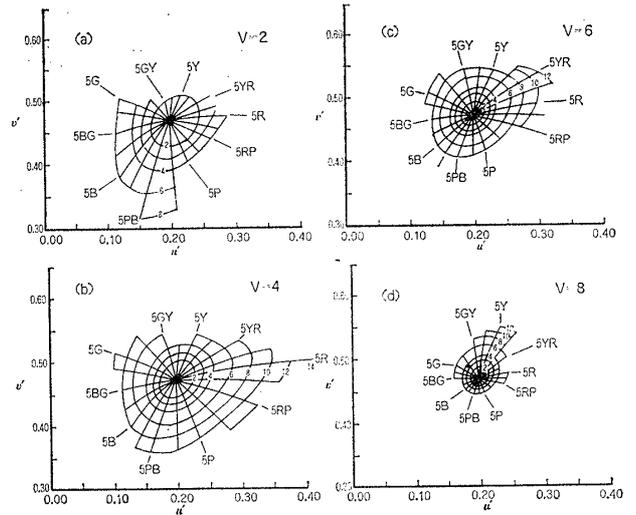


Fig.7 合成分光反射率分布の使用による標準の光 D_{65} 下の u' , v' 色度のグリッド——(a) はマンセル明度 2, (b) は 4, (c) は 6, (d) は 8 に対する結果を示す

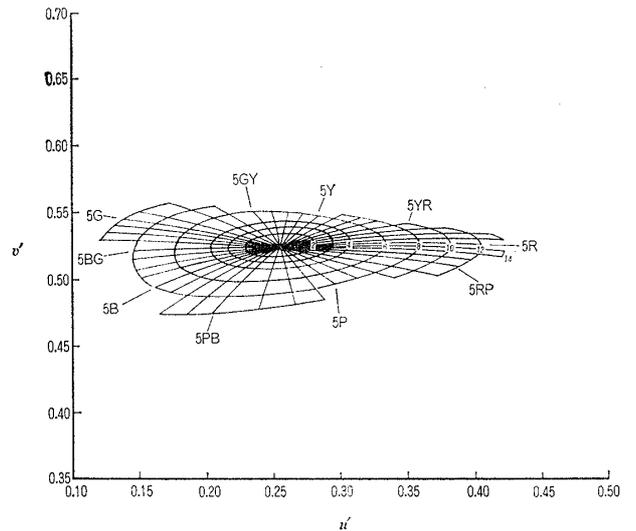


Fig.8 マンセル明度 5 に対する合成分光反射率分布による標準の光 A 下の u' , v' 色度のグリッド

4.3. 使用色票に関して

現実のマンセル色票として、米国マンセル社から標準色票¹⁰⁾が市販されており、マンセル色票としてはこれが原典版である。しかしながら、本報ではマンセル色票の分光反射率分布の解析において、日本規格協会による色票セットを用いた。それは次の理由による。(1) 後者については、数値化されたデータが入手できるが、前者についてはデータがグラフでしか持ち合わせていなかった。(2) 後者の方が実現されている色票の種類がいくぶん多かった。従って分光反射率分布の解析はより緻密に行なえると期待された。(3) 我国では、色票はマンセル社のものよりも、日本規格協会のものの方が利用される機会が多い。

一部のマンセル色票について両者の分光反射率分布が

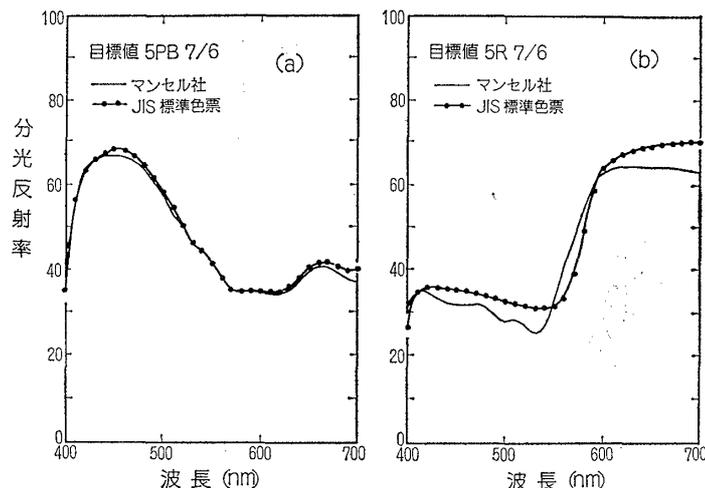


Fig. 9 同一マンセル記号を目標に製作された色票の分光反射率分布の比較——実線はマンセル社による色票¹⁰⁾, ●印付き実線は JIS 標準色票³⁾の曲線を示す——(a) は 5PB7/6 に対する曲線で比較的一致の程度が良好な例, (b) は 5R7/6 に対する曲線で両曲線のメタメリズムの程度が比較的大きい例を示す

グラフで比較された。一致の程度はおおむね良好であったが、明確な不一致を示す例もしばしば認められた。Fig. 9 は両者の分光反射率分布の比較の例を示している。Fig. 9(a) は一致の良好な例であり、Fig. 9(b) はメタメリズムの度合の強いと思われる例である。

本報の解析法は、任意な色票セットに適用できるが、結果として得る曲線は、使用される元の色票セットに依存する。マンセル社の色票に対するデータを用いた場合、本報で示した表と幾分違った表を与えるかもしれない。しかし、重大な差はないと予想される。実用的には、本報で与えた表を用いて合成される分光反射率分布は、表面色に関する色の見えの研究に十分使用できると期待される。

5. むすび

筆者らが試みたマンセル色票の分光反射率分布の解析により得られた結論は次のようである。

1. 現実の色票の分光反射率分布は主成分分析により三つの成分に分解できる。
2. 三つの成分の使用により、表面色の標準の光 C に対し、所定の三刺激値を与える分光反射率分布を合成する方法を与えた。
3. 合成分光反射率分布は、解析の元となった色票の分光反射率分布を良好に再現できる。
4. 合成分光反射率分布の使用により、標準の光 C 以外の種々の実用白色光源について滑らかな形状の色度座標のグリッドが得られる。

謝辞

本研究の解析に用いた JIS Z 8721 準拠標準色票 (光

沢版) の分光反射率分布値を御提供下さいました元日本色彩研究所の川上元郎博士に謝意を表します。

最後に、本研究の遂行において種々御援助下された大阪電気通信大学池田潤平教授、ならびに解析の入力データの作成および各種計算に御協力下さった大阪電気通信大学卒業研究生の松岡功、増田博、安東俊和、上村好成、原康雄、両尾匡史、小野正明、野方昇の諸氏に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) JIS Z 8721 : 日本規格協会 (1977)
- 2) S. M. Newhall, D. Nickerson, and D. B. Judd : *J. Opt. Soc. Am.* **33** (1943) 385
- 3) JIS Z 8721 準拠, 標準色票 (光沢版) : 日本規格協会 (昭 51)
- 4) K. Takahama and Y. Nayatani : *J. Opt. Soc. Am.* **62** (1972) 1516
- 5) 高浜幸太郎, 側垣博明, 納谷嘉信 : 照学誌 **67** (昭 58) 241
- 6) D. B. Judd, D. L. MacAdam, and G. Wyszecki : *J. Opt. Soc. Am.* **54** (1964) 1031
- 7) 納谷嘉信, 栗岡豊, 側垣博明 : 照学誌 **55** (昭 46) 481
- 8) 広野順三, 高浜幸太郎, 側垣博明 : 照学誌 **66** (昭 57) 433
- 9) W. A. Thornton : *J. IES* **6** (1976) 79
- 10) Munsell Book of Color (Glossy) : Macbeth Division of Kollmorgen Corp. (1976)

(受付 昭和 58 年 11 月 14 日)