

シリーズ解説 表色系 第6回

“均等色空間(I) — Munsell 色空間から CIELAB へ —”

Uniform Color Space (I) — from Munsell to CIELAB —

小林光夫 KOBAYASHI, Mituo 電気通信大学 The University of Electro-Communications

1. Munsell 色空間

本シリーズの読者ならば、Munsell 表色系のことはよくご存知のことと思います。今回、均等色空間を解説するに当たって、まず Munsell 表色系の特徴について、簡単にまとめておきます。

Munsell 表色系の表色値(H, V, C)は、知覚色の三属性である色相(ヒュー, *hue*) H 、明度(バリュー, *value*) V 、および彩度(クロマ, *chroma*) C によって定まります。そして、図1に示すように、 V を軸方向、 C を半径方向、 H を円周方向¹の座標とする円柱座標系で構成される3次元空間が、Munsell 色空間です。

明度 V は、理想的な白を $V = 10$ 、理想的な黒を $V = 0$ とし、その間を、知覚的に等歩度となるように定めています。“等歩度”とは、1ステップの差がどこでも同じ違いを表していることをいいます。たとえば、 $V = 1$ と $V = 2$ の明度差は、 $V = 2$ と $V = 3$ の明度差と知覚的に同じ違いを表すことになります。また、 $V = 5$ は、白と黒のちょうどまん中の明度を表わすこ

とになります。

彩度 C は、無彩色を $C = 0$ とし、鮮やかさが增すに従い等歩度に増します。 C の1ステップの差は、色相によらず同じ違いをあらわします。

色相 H は、次のように定められています。まず円周を5等分し、各分点に5つの基本色相 R(赤), Y(黄), G(緑), B(青), P(紫)をこの順に割り当て、つぎに隣り合う2基本色相の中間に中間色相 YR(黄赤), GY(黄緑), BG(青緑), PB(青紫), RP(赤紫)を配し、計10個の代表色相を定めます。さらに、これらの10代表色相の各色相を中心に、10ステップの細分色相を定め、全周を100ステップとします。こうして定まる色相尺度は、知覚的に等歩度性が成り立つとされています。

色相 H を数値で表わすには、基本色相の R を $H = 5$ とし、R から YR を経て Y へ向かう方向を正として全周を 0 ~ 100 で表わします。この数値表現は、計算には便利ですが、人間向きには、各代表色相が表わす色相範囲ごとに、色相記号に細分色相を表わす 0 ~ 10 の数値を前置して表記するのが普通です。たとえば、 $H = 5$ は 5R、 $H = 12.5$ は 2.5YR などと表記されます。10個の代表色相は、記号表記するときにはすべて数字5が付されることになります。ついでに、明度と彩度を人間向きに表記するときには、明度と彩度の数値の間に斜線を入れて分数のように書き、色相表記の後に添えます。たとえば、 $H = 12.5$, $V = 8$, $C = 6$ の色は“2.5YR 8/6”のように書きます。無彩色については、文字 N の後に明度を添えて、たとえば $V = 5$ の無彩色は“N5”のように書きます。

さて、上に述べたように、Munsell 表色系の第一の特徴は、表色値(H, V, C)の各成分が知覚的な等歩度性をもつということです。ただし、 H, V, C それぞれの1単位の違いが、知覚的に同等かということ、そうではありません。たとえば V の1単位の違いは知覚的には C の2単位の違いに相当するとか、 $C = 5$ のときの

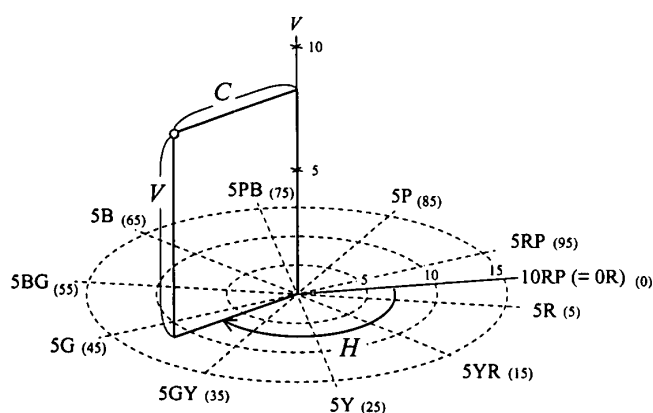


図1 Munsell 色空間

¹ H の向きは、Munsell 色空間では時計回りを正にとるのが普通です。本稿でもそのようにしています。ただし、書物によっては数学上の習慣に従い反時計回りを正にとっているものもあります。

C の1単位の違いは H の3単位の違いに相当するなど、いろいろな説があることに注意しておきます。

なお、二つの色の知覚的な差を、色差(color difference)と呼びます。

[ΔC と ΔH の関係]

Munsell色空間では、明度一定面において同一彩度 C の軌跡は半径 C の円をなすことから、彩度の尺度は色相によらないことは明らかです。このことから、等 V 面は等方的(isotropic)であると考えてよいでしょう。すなわち等 V 面上では、任意の2点間のユークリッド距離が同じならば知覚的色差も同じであると考えてよさそうです。そうであれば、色相 H の1単位の変化が彩度 C の何単位の変化に相当するかは、次のように、自動的に決まってしまうことになります。

彩度 C における色相 H の ΔH 単位の変化は、半径 C の円周上では、長さ $C \times \frac{\Delta H}{100} \times 2\pi = \frac{\pi}{50} C \Delta H$ の弧を描きます(図2)。この量は、 ΔH が小さければ、ほぼ直線的な色の変化に等しく、したがって知覚的色差を表わすと考えられます。これと同じ色差を表わす彩度の変化量を ΔC とすれば、 $\Delta C = \frac{\pi}{50} C \Delta H$ 。じっさいに、 $C = 5$ の場合では、 $\Delta C = \frac{\pi}{50} 5 \Delta H = \frac{\pi}{10} \Delta H$ となりますから、 $\Delta H = \frac{10}{\pi} C \approx 3 \Delta C$ 、ここで $\Delta C = 1$ とすれば $\Delta H \approx 3$ 。すなわち C の1単位の変化は H の約3単位の変化に相当することが、結論されます。

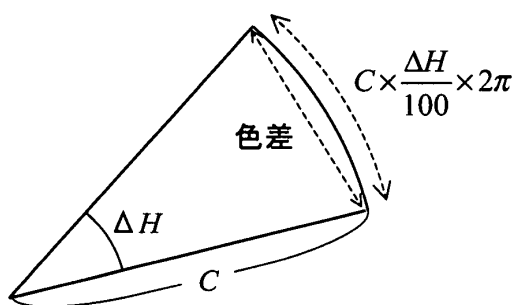


図2 彩度 C 一定で色相が ΔH 変化した時の弧の長さと色差

Munsell表色系の第二の特徴は、実用の見地から、耐候性のある色材で作られた色票集が存在することです。表色値に従って系統的に配列された色票によって、表色値と実際の色との対応が与えられる表色系のことを色票系(カラーオーダーシステム, color order system)といいますので、Munsell表色系は、Munsell色票系とも呼ばれます。

色票系では、表色値と実際の色との対応を直感的に知ることができるといった利点の他に、限られた観測条件のもととはいえ、色票を測色することにより、表色値と三刺激値との対応表を作ることができるという利点があります。

日本では、Munsell色票系による表色値の定め方が、“色の表示方法”としてJIS Z 8721に規定されており、またその標準色票集が日本規格協会から出版されています(初版S34)。色票を観察するとき、照明光や背景によって同じ色票でも色は異なって見えます。ところがJISには、色票をどういう背景で見たときの色を規定しているのかについては、はっきりとした記述がありません。しかし、後述する理由により、Munsellの表色値は、色票をC光照明下で中間明度(視感反射率 $Y = 20$ 程度)の灰色背景で見たときの色を定めている、と考えてよいでしょう。

JIS Z 8721には、標準色票のMunsell表色値に対応する Y 値と xy 色度座標の組が数表の形で収められています。 Y 値と xy 値から XYZ 値は容易に計算できますから(シリーズ第4回, p.304)、このような数表があれば、色知覚と刺激値とを結びつけることができ、色彩の工学的な利用に大いに役立つこととなります。これが、色票系として実現されていることからくるMunsell表色系の大きな特徴となっています。

Munsell色空間におけるJIS色票の分布を図3と図4に示します。図3の上段は色票の作る3次元の色立体、下段は $V = 2, 4, 6, 8$ の等 V 色の分布です。図4の左段は $C = 2, 4, 6, 8, 10$ の等 C 色の分布、右段は代表10色相の等 H 色の分布です。

2. XYZ色空間は均等か

色空間の中に任意の2点をとったとき、その2点間の距離²が、2点の表わす色の知覚的色差に比例するとき、あるいはほぼ比例するとき、この色空間を均等色空間(uniform color space)と言います。

Munsell色空間は、その円柱座標成分 H, V, C の等歩度性と、各成分1単位の変化の知覚的な対応関係が与えられることから、各成分の1単位の長さをうまく合わせれば均等色空間を構成することができます。このような座標成分の尺度を合わせることを含んで、Munsell色空間は均等色空間であると言ってもよいで

² 2点を結ぶ線分の長さのこと。厳密にはユークリッド(Euclid)距離と呼びます。他にも、距離の性質をもつ量はたくさんあるので、正確に述べるとこのような言い方になります。

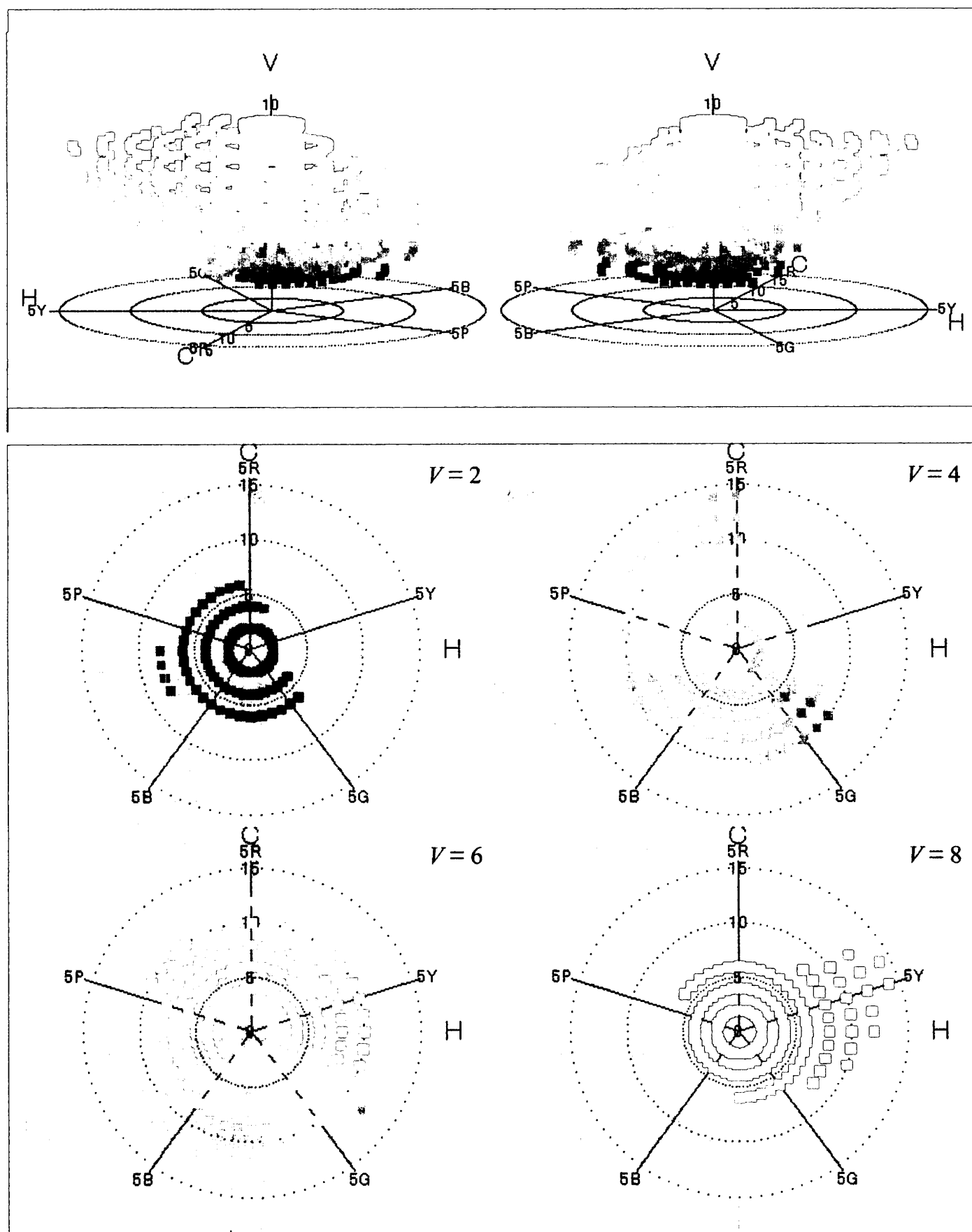


図3 Munsell色空間におけるJIS色票の分布(立体図と等V色)

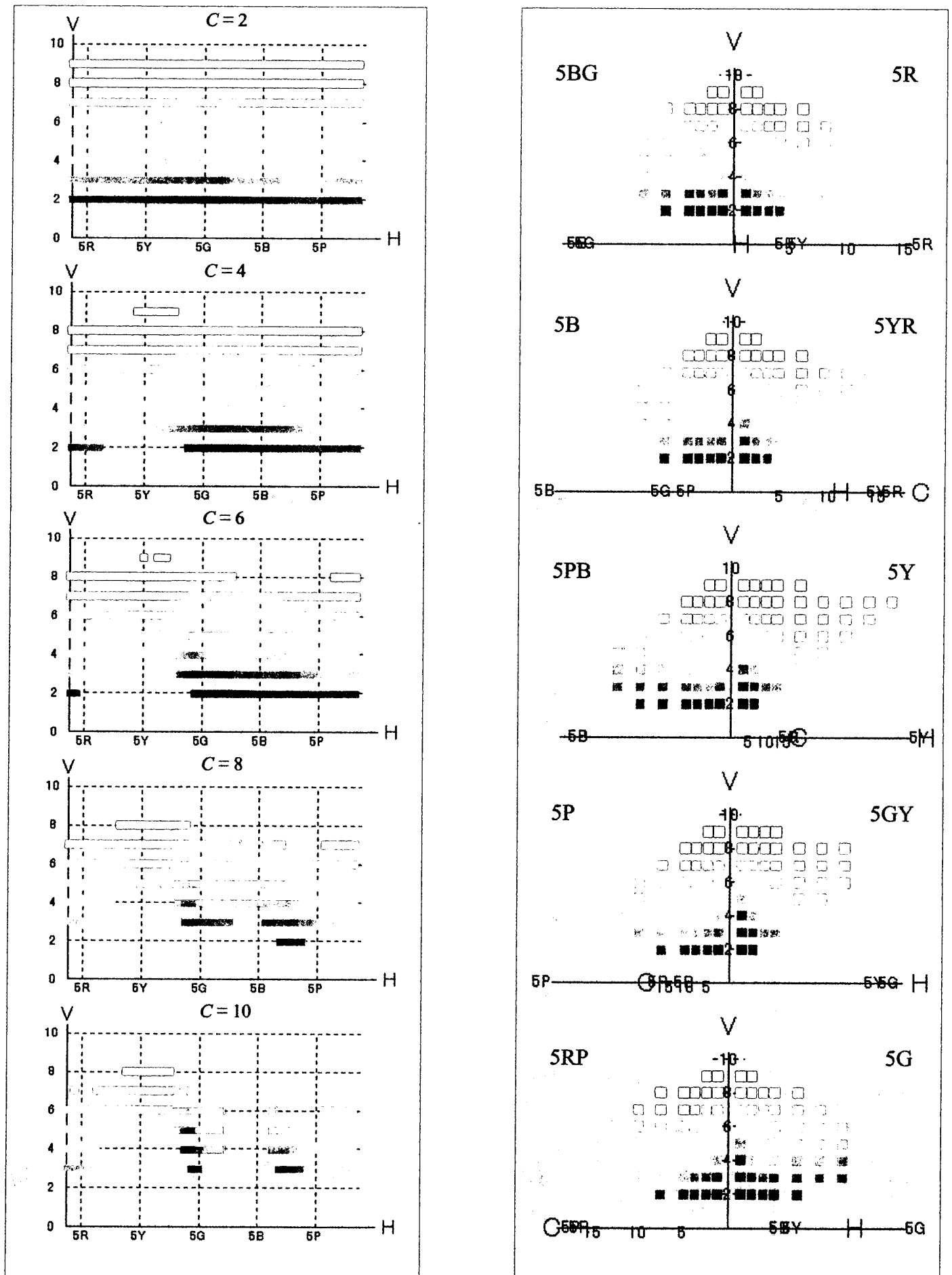


図4 Munsell色空間におけるJIS色票の分布(等C色と等H色)

しょう。

それでは、これまで扱ってきた XYZ 色空間は均等でしょうか。特定の視環境のもとではありますが、Munsell 表色値と XYZ 三刺激値の対応が与えられることから、 XYZ 色空間の均等性をチェックすることができます。

図 5 をご覧下さい。図 5 は、JIS 色票の色を XYZ

色空間にプロットしたものです。左下が立体図、その他は X , Y , Z の各軸方向から見たときの 3 面図です。上段の YZ 面図(X 軸方向から見た図)や XY 面図(Z 軸方向から見た図)を見ると、同じ明度 Y をもつ色は Y が一定であり、かつ Y が大きくなるにつれ、 Y の 1 単位の変化に応じた Y 方向の変化は次第に大きくなっていることがわかります。また、 ZX 面図(Y 軸方向から

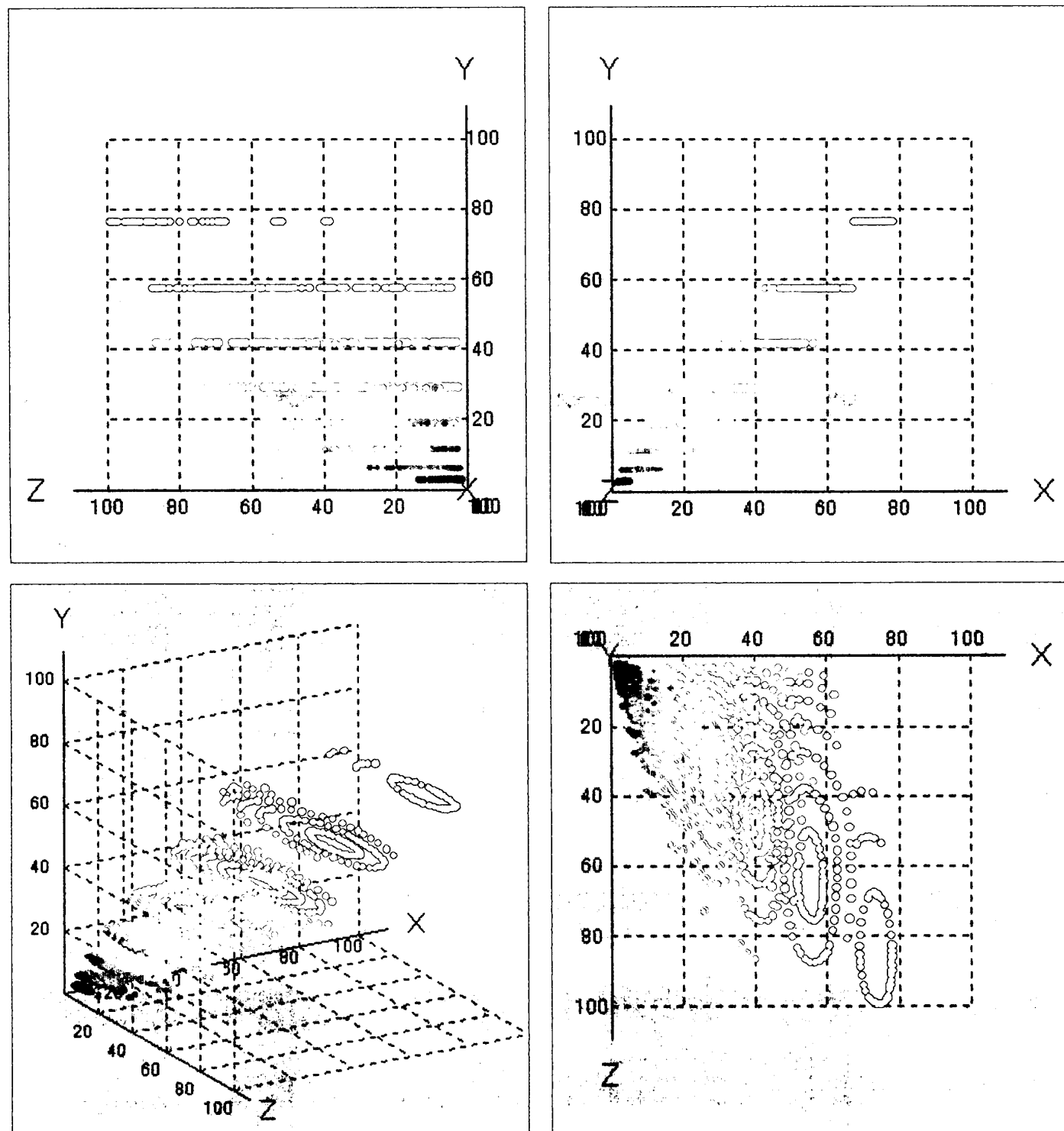


図 5 XYZ 色空間における JIS 色票の分布(立体図と 3 面図)

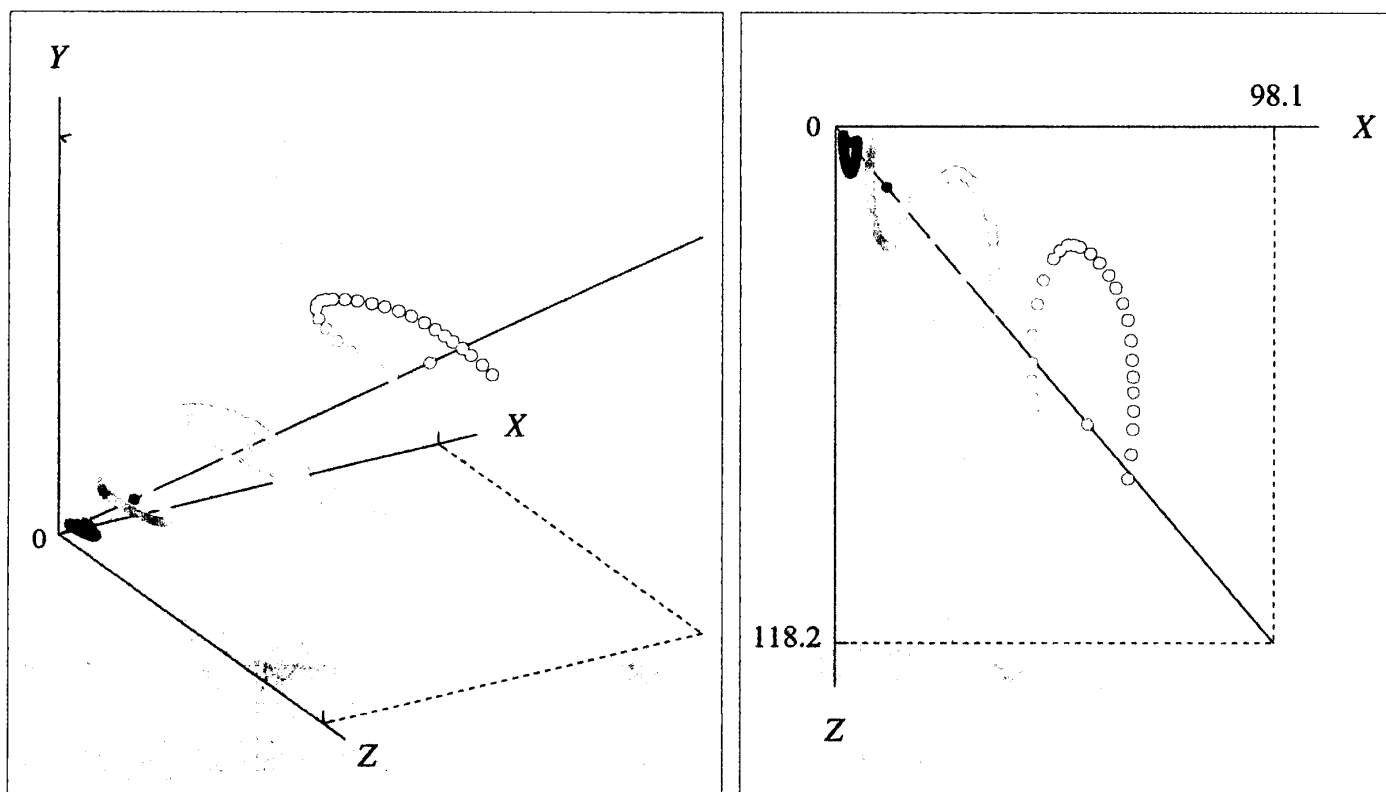


図6 XYZ色空間における無彩色と $C=6$ の有彩色

見た図)では、同じ彩度 C の色は円とはならず Z 軸方向に引き伸ばされた楕円状になっています。これらのことから、XYZ色空間は均等色空間でないことは明らかです。

もう少し詳しく様子を知るために、 $V=2, 4, 6, 8$ における無彩色および $C=6$ の有彩色がXYZ色空間のどこにどのように配列されるかを見てみましょう(図6)。図6を見ると、無彩色の点列は、XYZ色空間の(理想の黒を表わす)原点(0, 0, 0)から C 光の照明を完全拡散反射面に当てたときの三刺激値(98.1, 100.0, 118.2)を座標とする(理想の白を表わす)点に向かう直線上にあることがわかります。また、無彩色の点列の間隔や $C=6$ の有彩色の楕円状の軌跡が、 V が大きくなるにつれ大きくなる様子がわかります。理想の白を表わす点の三刺激値は引用されることが多いので、今後(X_n, Y_n, Z_n)と書くことにします。(今の場合は $X_n=98.1, Y_n=100.0, Z_n=118.2$.)

無彩色の三刺激値を(X, Y, Z)とすると、無彩色は2点(0, 0, 0)および(X_n, Y_n, Z_n)を結ぶ直線上にありますから、 k を0と1の間の適当な数として

$$X = kX_n, \quad Y = kY_n, \quad Z = kZ_n \quad (1)$$

と書けます(図7)。一方、無彩色の V 値と Y 値との関

係は、図8の+印のように与えられています。

このグラフを見ると、 Y は V の多項式(1次式、2次式、3次式など)で表わせそうです。じっさい、いろいろな研究者が V - Y の関係を表わす近似式を考案しています。はじめ、 V - Y の関係を表わすもっとも簡単な2次式として、

$$Y = V^2 \quad (2)$$

が考えられました。これは、白背景のときの無彩色の Y 値を近似するものですが、図8に示す色票の V - Y グラフとはだいぶ異なります。

2次式のつぎは、3次式による近似も考えられましたが、現在もっとも近似のよい式として、5次式

$$Y = 1.1913V - 0.22532V^2 + 0.23351V^3 - 0.020483V^4 + 0.00081936V^5 \quad (3)$$

が作られています(JIS Z 8721にも載っています)。この式は、中間明度(およそ $Y=20$)の灰色背景における無彩色票の Y 値を表わすものとされており、図8からわかるようになりに近似が良いです。このことから、JIS色票の V - Y の関係は、灰色背景のときの値と考えられます。

V と Y の関係が式(3)で与えられるものとして、式

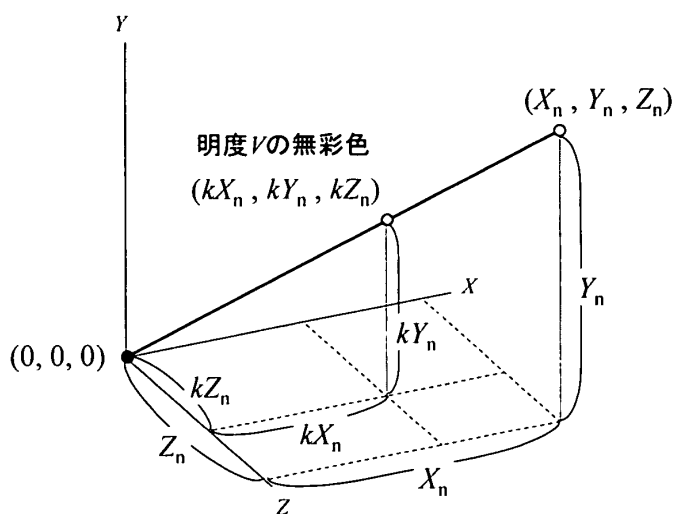


図7 XYZ色空間における無彩色の位置

(1)の k を置き換えると、無彩色の三刺激値をMunsellの明度 V から計算する式

$$X = w(V)X_n, Y = w(V)Y_n, Z = w(V)Z_n \quad (4)$$

が得られます。ただし、

$$w(V) = \frac{1}{Y_n} (1.1913V - 0.22532V^2 + 0.23351V^3 - 0.020483V^4 + 0.00081936V^5) \quad (5)$$

とおきました。

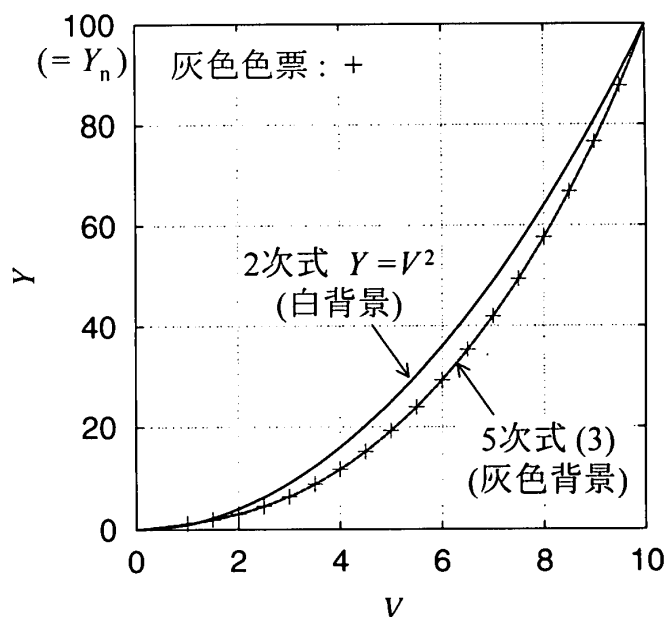
3. 均等色空間 CIELAB を導く

さて、式(4)および式(5)で与えられる明度 V と視感反射率 Y との関係を、横軸を Y/Y_n 、縦軸を V とするグラフに書いてみると、図9のようになります。これまでこのグラフは、縦座標 V に対応する横座標 Y/Y_n を与える関数 w のグラフと考えてきたわけですが、見方を変えて横座標の Y/Y_n に対する縦座標 V を与える関数 v のグラフと考えることもできます。(数学的には v は w の逆関数ということになります。)すなわち、 w と v について常に

$$Y/Y_n = w(V) \text{ かつ } V = v(Y/Y_n) \quad (6)$$

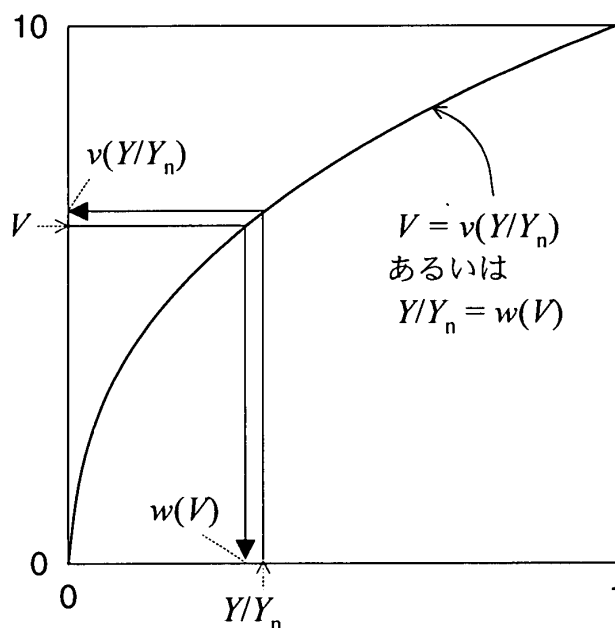
が成り立ちます。

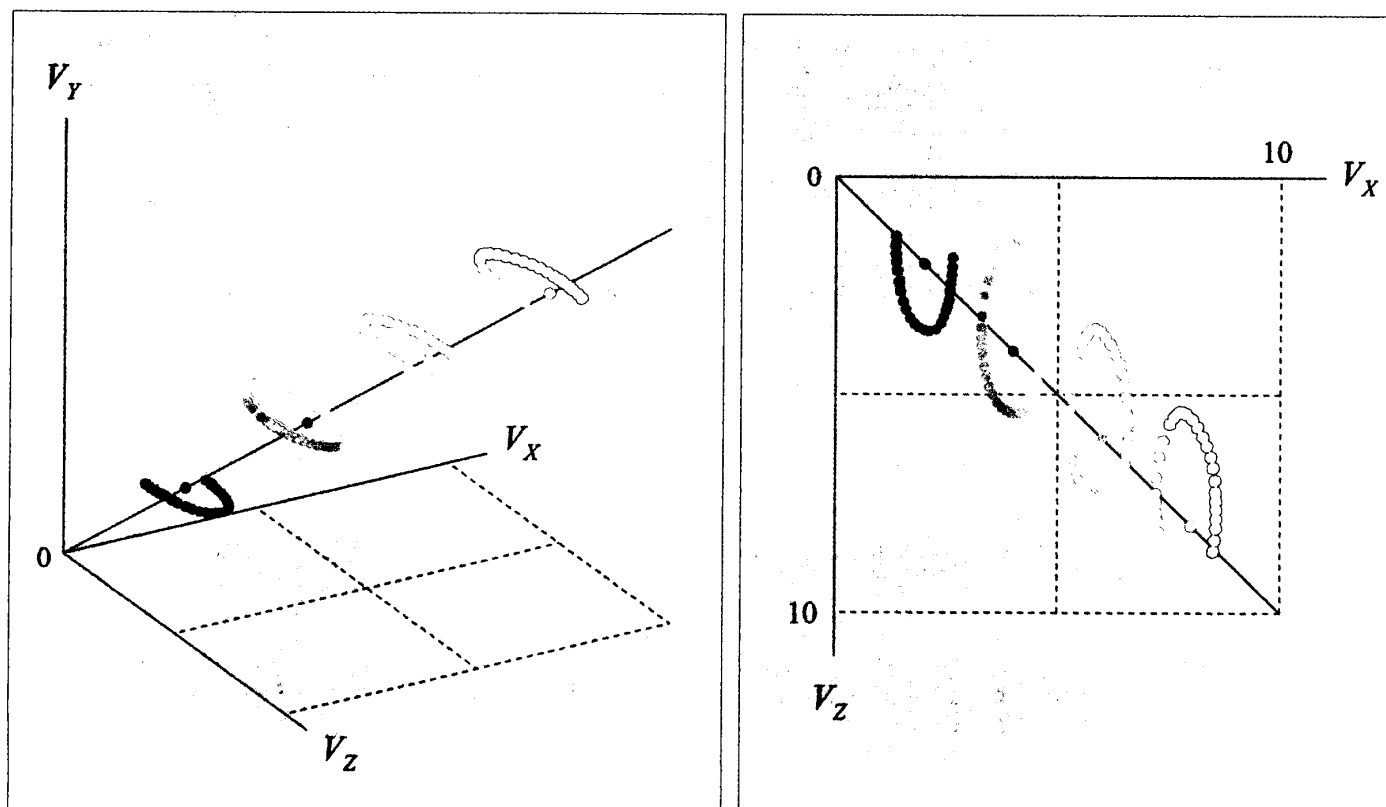
一般に、明度を視感反射率の関数で表わすとき、これを明度関数(lightness function)といいます。し

図8 無彩色の明度 V と Y の関係

たがって、 v は明度関数ということができます。

さて、じっさいに Y/Y_n を与えてこれに対応する V を数値的に求めるには、式(5)を使って $Y/Y_n = w(V)$ を満たす V を探すこと、すなわち Y を与えて式(3)を満たす V を探すことが必要です。これは、 V の5次方程式を解かなければならないので、簡単ではありません。(ただし、コンピュータを用いて数値計算をするつもりならば、Newton-Raphson法というポピュラ

図9 関数 w と関数 v

図 10 $V_X V_Y V_Z$ 空間における無彩色と $C = 6$ の有彩色

一な方法でいとも簡単に計算できます。Newton-Raphson 法は、どの数値計算の教科書にも載っていますので、意欲ある方はチャレンジしてみてください。) ここでは、 Y/Y_n を与えると $V = v(Y/Y_n)$ が計算できるものとして、話を進めます。

明度関数 v を用いれば、式(6)から明度が計算できることを知ったわけですが、ここで v を X/X_n および Z/Z_n に適用し、新たに

$$\begin{aligned} V_X &= v(X/X_n), \\ V_Y &= v(Y/Y_n), \\ V_Z &= v(Z/Z_n) \end{aligned} \quad (7)$$

という (X, Y, Z) から (V_X, V_Y, V_Z) への変換を考えてみます。JIS 色票の無彩色および $V = 2, 4, 6, 8$ における $C = 6$ の有彩色の三刺激値を、式(7)により (V_X, V_Y, V_Z) に変換し、 $V_X V_Y V_Z$ 空間にプロットしてみると、図 10 のようになります。

$V_X V_Y V_Z$ 空間では、無彩色は原点 $(0, 0, 0)$ から $(10, 10, 10)$ へ向かう直線上に、 V の変化に対応して等歩度に移行しています。また $V_X V_Z$ 面を見るとわかるように、 $C = 6$ の等彩度軌跡は、楕円状ではありますがほぼ同じ大きさとなりました。この楕円の縦横比は約 2.5 : 1 ですから、 V_X 方向の尺度を V_Z 方向の尺度の

2.5 倍とすれば、等彩度軌跡は円に近くなると思われます。さらに、等彩度軌跡の中心(同じ V 値をもつ無彩色)が原点にくるようにシフトすれば、Munsell 色空間に似た色空間が作れるでしょう。こうして、Adams と Nickerson によって次のような変換が考えられました。

$$\begin{aligned} L &= 9.2 V_Y, \\ a &= 40(V_X - V_Y), \\ b &= 16(V_Y - V_Z). \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 V_X, V_Y, V_Z は式(7)で与えられるものです。この (L, a, b) を直交座標とする 3 次元色空間は、Adams と Nickerson の ANLAB 色空間と呼ばれるひとつの均等色空間です。ANLAB 色空間は、 L が明度に、 a が赤緑反対色応答に、 b が黄青反対色応答に対応した意味をもつ均等色空間ですが、 XYZ 三刺激値から L, a, b を計算するのは、先に述べた $v(Y/Y_n)$ などの計算を要しますので容易ではありません。また、理想の白の視感反射率 $Y = 100$ に対応する L の値が 92 となり、数値的にも美しくありません。

式(8)のもつ上の難点を改良した変換として、変換

$$L^* = 116 f(Y/Y_n) - 16,$$

$$\begin{aligned} a^* &= 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)], \\ b^* &= 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] \end{aligned} \quad (9)$$

が考えられました。ここに、関数 f は

$$f(x) = \begin{cases} x^{1/3}, & x > 0.008856, \\ 7.787x + \frac{16}{116}, & 0 \leq x \leq 0.008856 \end{cases} \quad (10)$$

で与えられるものです。関数 f は明度関数そのものとはなりませんが、 $L^*/10$ は、図 11 に示すように、Munsell 明度を良く近似しています。そういうわけで、 L^* は明度指数または(メトリック)明度と呼ばれます。メトリックという辞を付けるのは、知覚的な明度と区別するためです。ついでに、 a^* と b^* は、正式には色質指数という名がついていますが、この名はあまり使われていないようです。ANLAB 色空間と同様に、 a^* は赤緑反対色応答に、 b^* は黄青反対色応答に対応した意味をもちます。無彩色では、 $X/X_n = Y/Y_n = Z/Z_n$ が成り立ちますので、式(9)から $a^* = b^* = 0$ となります。

こうして定められた (L^*, a^*, b^*) を直交座標とする色空間は、 $L^*a^*b^*$ 色空間と呼ばれ、現在工業界ではもっともよく使われる均等色空間の一つとなっています。この色空間は、1976 年に標準の均等色空間の一つ(他にもう一つある。次回に述べます)として CIE (国際照明委員会)によって定められたので、 $\tilde{\text{CIE}}\text{LAB}$ 色空間とも呼ばれます。

なお、式(9)中の (X_n, Y_n, Z_n) は、これまでは C 光による理想の白の三刺激値としてきましたが、C 光に限らず、任意の照明光に対する理想の白の三刺激値とすればよいことになっています。

図 12 に、CIELAB 色空間における JIS 色票の分布を示します。Munsell の明度段階がほぼ同一間隔となっていることや、等彩度の色がほぼ同心円状になっていることがわかんと思います。

ところで、CIELAB 色空間は直交座標系によって定められましたが、同じ CIELAB 色空間を、Munsell 色空間のような円柱座標系で表わすこともできます。明度軸 L^* は直交座標も円柱座標も共通ですので、色みを表わす 2 次元の直交座標 (a^*, b^*) とそれを極座標で表わした (C^*, h) との関係をみればよいわけです。ここに、 C^* は原点 $(0,0)$ から点 (a^*, b^*) までの距離、 h は a^* 軸からの角(反時計回りを正にとる)を表わすものとします(図 13)。ピュタゴラス(Pythagoras)の定

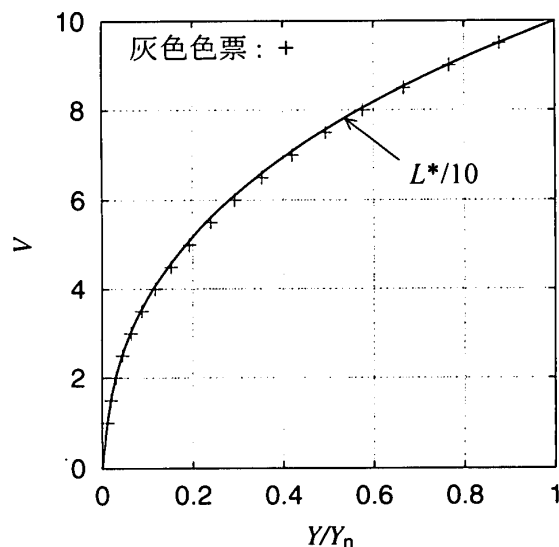


図 11 Munsell 明度 V と $L^*/10$

理と三角比から

$$\begin{aligned} C^* &= \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}, \\ h &= \tan^{-1}(b^*/a^*) \end{aligned} \quad (11)$$

あるいは

$$\begin{aligned} a^* &= C^* \cos h, \\ b^* &= C^* \sin h \end{aligned} \quad (12)$$

の関係が成り立ちます。³

C^* は彩度に相当しますので、(メトリック)彩度と呼ばれ、 h は色相に対応する角ですので(メトリック)色相角と呼ばれます。もちろん、無彩色では $C^* = 0$ となります。なお、 $C^* = 0$ のとき h の値は考えません(未定義)。

式(11)は直交座標から極座標への変換式、式(12)は極座標から直交座標への変換式です。上記で得られた (C^*, h) を使えば、CIELAB 色空間の直交座標 (L^*, a^*, b^*) で表わされる色は、円柱座標では (L^*, C^*, h) と表わ

³ $\tan^{-1}$ は $\tan$ の逆関数であり、一般には多価となりますが、 a^*, b^* の正負に従い、次のように定めます。

$a^* > 0, b^* = 0$ のとき	$h = 0,$
$a^* > 0, b^* > 0$ のとき	$0 < h < \pi/2,$
$a^* = 0, b^* > 0$ のとき	$h = \pi/2,$
$a^* < 0, b^* > 0$ のとき	$\pi/2 < h < \pi,$
$a^* < 0, b^* = 0$ のとき	$h = \pi,$
$a^* < 0, b^* < 0$ のとき	$\pi < h < 3\pi/2,$
$a^* = 0, b^* < 0$ のとき	$h = 3\pi/2,$
$a^* > 0, b^* < 0$ のとき	$3\pi/2 < h < 2\pi,$
$a^* = 0, b^* = 0$ のとき	未定義。

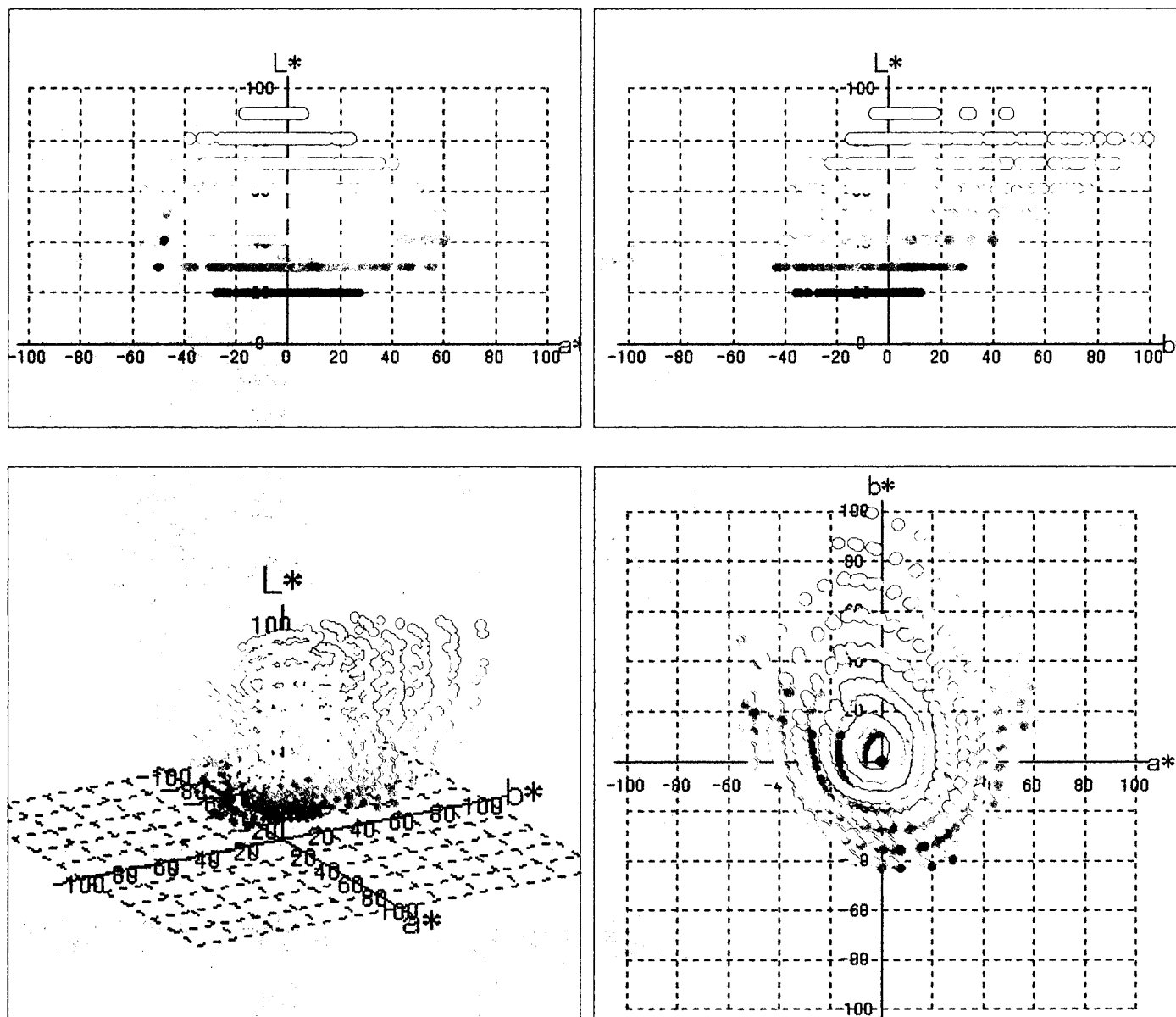
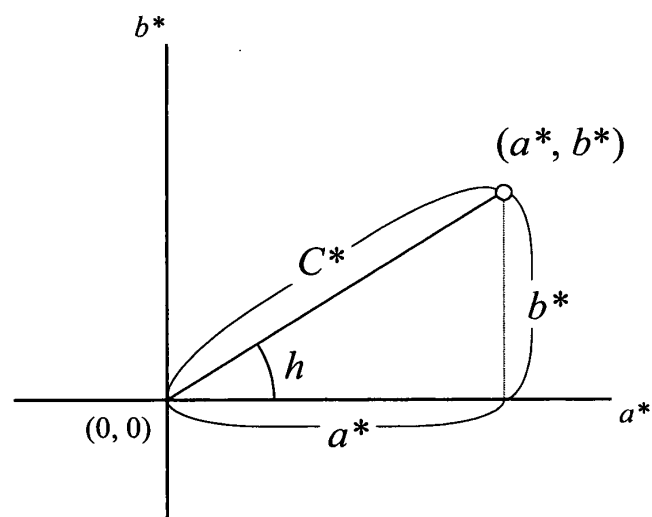


図 12 CIELAB 色空間における JIS 色票の分布(立体図と 3 面図)

図 13 直交座標(a^* , b^*)と極座標(C^* , h)との関係

されることになります。このように、同じ CIELAB 色空間において、三つの数値を使って表わす色の表わし方は、(L^* , a^* , b^*)と(L^* , C^* , h)の二通りあるわけです。色空間が同じでも表色系としては違うものであることに注意が必要です。(“色空間”と“表色系”という語は同じ意味で用いられる場合もありますが、本来は違う意味をもっています。上のような場合には、その違いがでてきます。)

表 1 に、いくつかの色紙の(C 光照明下の)測色値(Munsell 値, XYZ 値)と L^* , a^* , b^* , C^* , h の値をあげておきます。

CIELAB の話を終えるに当たって、(L^* , a^* , b^*)で与えられた色を他の色空間で表わすときに必要となる

表1 色紙の(C光照明下の)測色値(Munsell表色値, XYZ値)と L^* , a^* , b^* , C^* , h の値

色紙	Munsell	X	Y	Z	L^*	a^*	b^*	C^*	$h(^{\circ})$
赤	6R 4/15	23.0	12.3	3.9	41.70	59.83	35.37	69.51	30.6
黄	5Y 8/14	58.0	60.4	5.1	82.03	-2.77	98.70	98.74	91.6
緑	5G 4/10	7.3	15.0	11.0	45.57	-55.09	15.44	57.21	164.3
青	5B 4/9	8.9	12.1	32.2	41.33	-22.05	-30.84	37.91	234.4
紫	5P 4/11	15.5	10.4	30.1	38.49	35.71	-32.76	48.46	317.5
白	N9.4	83.2	84.9	95.7	93.86	-0.19	3.05	3.05	93.5
灰	N5.0	18.8	19.2	22.2	50.91	-0.06	0.83	0.83	94.1
黒	N1.1	1.3	1.3	1.5	11.41	0.01	0.41	0.41	88.1

$L^*a^*b^*$ -XYZ変換を紹介しておきましょう.

まず, 式(10)で定義された関数 f の逆関数 g は, 次のようになります.

$$g(y) = \begin{cases} y^3, & y > 0.206893, \\ \frac{1}{7.787} \left(y - \frac{16}{116} \right), & \frac{16}{116} \leq y \leq 0.206893. \end{cases} \quad (13)$$

この g を使うと, (X, Y, Z) は次のように計算できます.

$$\begin{aligned} X &= X_n g\left(\frac{L^*+16}{116} + \frac{a^*}{500}\right), \\ Y &= Y_n g\left(\frac{L^*+16}{116}\right), \\ Z &= X_n g\left(\frac{L^*+16}{116} - \frac{b^*}{200}\right). \end{aligned} \quad (14)$$

ただし, (X_n, Y_n, Z_n) は, 照明光を完全拡散反射面に当てたときの(理想の白の)XYZ三刺激値です.

紙数の都合で本稿はこれまでとします. 次回は, もう一つの均等色空間CIELUVと色差の話をするつもりです.