

個人の色知覚に適合する表色系の数値モデル

広内哲夫
坂本和義

A Mathematical Model of the Color Order System Adaptable to Individuals' Color Perception

Tetsuo Hirouchi
Kazuyoshi Sakamoto

要 旨

表色系は大きく分けて、顕色系と混色系がある。前者は心理学的な立場から構成され、後者は測色学的な立場から構成される。筆者は、利用者の立場からは顕色系であり、ソフトウェアの作成原理からすれば混色系である電子的な表色系ACSを開発した。この表色系はNCS精神を受け継いでおり、各個人の色知覚に適合するという特徴を持っている。ACSを構成するには、個人毎のユニーク色相と色構成比率と純度に関する測定に関する3つの心理実験を必要とする。被験者に負担をかけないで実験を行い、そこから得られる主観的データに基づいてACSを作り上げるには、色立体における色配置の数値モデルが必要となる。本論文では、この数値モデルを構成する方法について報告する。

Summary

The color order system is roughly classified into a color appearance system and a color mixing system. The former is composed from a psychological standpoint, whereas the latter is composed from a colorimetric standpoint. The authors of this paper have been successful in developing a color order system that can be regarded as a color appearance system from users' standpoint and concurrently can be dealt with as a color mixing system from a construction principle of software. The color system has inherited NCS spirit, and a feature is pointed out with the fact that the system is adaptable enough for the individual people's color perception. To compose ACS, 3 psychological experiments concerning the unique hue in accordance with the individual people, color composition ratio, and measurement in connection with purity are required. To build up ACS based on the subjective data obtained from the experiment conducted without applying any burden onto the objectives (examinees), a mathematical model of the color location on the color solid is required. In this paper, a report is released in connection with the method to compose the mathematical model referred to above.

1. はじめに

(a) 研究の意図：最近、超多彩色表示可能なパソコン、キャリブレーション付きの高精度カラーディスプレイ装置、高性能カラープリンター、高色彩型ビデオカメラなどが登場し始め、自然に近いムラのない色を画面やプリンターで一貫して再現する技術基盤が整い始めた⁽¹⁾。そして、パソコンを用いてカラーデータベースを構成したり、特定の色見本をディスプレイ装置を用いて電子的に再現したりし始めている⁽²⁾。また、特殊なビデオカメラによって、自然で質の高い画像を再現する技術も開発されており、このような技術を用いると、絵や美術品などをディスプレイ装置を用いて遠隔鑑賞することも可能になってくる⁽³⁾。

このように現在は色彩関係の技術開発が活況を呈している。筆者はこの状況に鑑み、従来の塗料を用いた色見本に替わって、電子化された色見本（電子色見本）の開発を構想した。コンピュータの強みは、1677万色もの多彩な色をディスプレイ画面に自由に再現できるところにあるので、カラーディスプレイ画面を表示媒体とする新しい概念の表色系を創案することが出来れば、これからのマルチメディア時代にふさわしいソフトウェアとしての色見本を創り出せる可能性があるものと思われる。本研究はその萌芽的な研究である。

(b) 研究の目的：表色系は大きく分けて、顕色系と混色系がある。前者は、色を視感的に評価しそれを数値や記号を用いて等歩度で表色系を構成するという心理的な立場から構成される。この代表として、米国で考案されたマンセル表色系やスウェーデンで開発されたNCS（natural color system）表色系が挙げられる。色と言うものは本来、人間の知覚現象が生み出すものなので、視感に基づく顕色系はその点、理にかなった表色系であると言える。ソフトウェアとして顕色系を実現する試みは、すでにいくつかなされているが^(4,5)、膨大なデータを必要とする。一方、後者の混色系は、色光の混色原理に基づく測色的な立場から構成される。その代表がオストワルド表色系である。混色系は、その表色系の数理モデルを創案することが出来れば、ソフトウェアとしての実現は比較的容易であると思われる。

そこで筆者は、電子色見本を作成する際の基礎となる表色系として、利用者の立場からは人間の色知覚を尊重した顕色系であるが、ソフトウェアの構成原理からすれば測色学に基づく混表系であるという、両表色系の特徴を活かしたコンピュータのカラーディスプレイ装置を利用する表色系を開発したいと考えた。本論文では、その表色系を具体化するための基礎理論について報告する。なお、この表色系は個人の色知覚に適合する特徴を持つので、本論文ではそれを適応型表色系（adaptive color system：ACSと略記）と呼ぶことにする。

以降、第2章でACSの構成原理を示す。第3章～第6章ではACSの数理モデルとそれを実現するための心理実験の方法論を説明する。ここで述べる基礎的な理論が今回の論文の主題である。ACSの構成の具体例ならびにその応用として電子色見本の試作については、次回以降の論文で示すことにする。

2. ACSの構成原理

2.1 心理実験に基づくACS

ACSの表色系の原理はNCSの考え方を基礎にしている。NCSの精神は、人間の色知覚に合った

自然な表色系を実現することにある。NCSは、人々が色に含まれていると感じる色味、白味、黒味の割合を、その表色系を構成するための基礎に置いている。そのため、多くの人々に対して心理実験を行い、そこで得られた色知覚の統計的な平均値をNCSの構成に用いている。色と言うものは、人間の知覚現象であるので、NCSが人々が心の中で感じる白味、黒味、色味の混合割合を表色系を構成する主要な要素にしているのは、他の顕色系に比べて優れている点でもある。

ところで、色の見えは本質的に主観の伴うものである。色味の基になるユニーク色相なども各個人によって変化し、中間色を構成する基本色の混合割合も人々により異なって感じられる。それ故、カラーディスプレイ画面を表示媒体とする新しい表色系を開発する際には、この立場を押し進めて、NCSでは完全には満たされていない、各個人の色知覚に適合する表色系を創造するのも1つの考え方である。

そこで筆者は、NCSの精神をさらに進めて、各個人の心の中にある色知覚を色判別の基準とする表色系ACSの開発を試みた。ACSは、表色系の基本原理としてはNCSの考え方を採用しているが、利用者にはカラーネーミング法等を用いた心理実験を課すので、その実験データに基づいて個々人の色知覚に適合する表色系となるのである。それゆえ、ACSは極めて心理的な色合いの強い顕色系であると言える。

色知覚に関するディスプレイ装置およびカラーネーミング法を用いる心理実験について、次の2点にコメントしておく。

(a) カラーテレビは光源色による色再現であるため、我々はその色を開口色モードと考えるかもしれない。しかし、通常の場合、画面中には複数の色が混在するので、我々は画面中の色をもっぱら表面色モードとして知覚している⁽⁶⁾。ディスプレイ装置を用いた色知覚の心理実験においても、画面中の試験色に対する背景色を白色あるいは灰色にするなどの工夫によって、その試験色を表面色モードとして知覚することが出来る。それゆえ、ディスプレイ画面の表示方法等を工夫すれば、限定された使用範囲内では、ディスプレイ画面を電子色見本の媒体として用いることも可能である。なお、ディスプレイ画面をマンセル表色系の表示媒体とする研究は、すでにMeyer等によって行われている⁽⁷⁾。

(b) カラーネーミング法による色の表現において、被験者個人の測定値は結構安定しており、実験毎のばらつきはそれほどでもないが、被験者毎の特性が顕著に現れ、必ず個人差が生ずるものである⁽⁸⁾。この点からも、個人の色知覚に適合する表色系ACSを開発する価値はありと、筆者は考えている。

2.2 ACSの基礎としてのNCS

ACSの基礎をなすNCSの概要を説明しておく^(8, 9, 10, 11)。NCSは、Heringによって提案された色覚の反対色説に基づいている。NCSの基本色は4つの基本有彩色（赤、黄、緑、青）と2つの基本無彩色（白、黒）の計6色であるが、その基本有彩色にはユニーク色を当てる。ユニーク色とは、個々人の心の中で経験的に感じとる知覚上の色であり、赤味、黄味、緑味、青味の4つのユニーク色がある。

NCSの色相環は、図1(a)に示すように円を4等分する位置に基本有彩色の赤／緑、黄／青の反対色同士を相対して配置する。そして、4つの4分円周上に赤と黄、黄と緑、緑と青、および青と赤の2色の基本有彩色同士が混ざり合った色をそれぞれ置く。その配置は、心理的に感じるその2色同士の構成比率に従って等間隔に行われる。この混合色は、白味も黒味も知覚されない純粋に色

味だけの色である。この色を文献9に従って完全色と呼ぶことにする。なお、本論文においては、白味と黒味を次のように定義しておく。白味だけの色とは色味と黒味が全く知覚されない色、また黒味だけの色とは光が全く感覚されない暗黒の色とする。

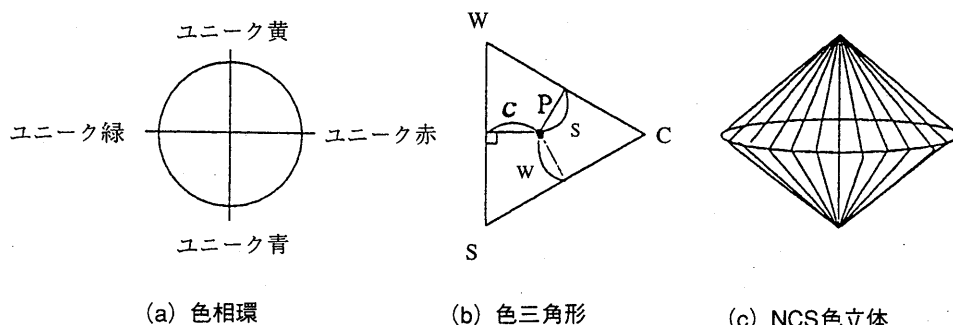


図1 NCSの色配置

色相の区別は基本有彩色間の構成比率で行われる。赤を開始点として、反時計周りの方向に1.0 (赤)、2.0 (黄)、3.0 (緑)、4.0 (青)と順序数を付け、それを色相 h とする。色相の小数点以下の数が基本有彩色間の構成比率を表す。色相 h は $1.0 \leq h \leq 4.999\cdots$ の範囲であり、 $h=5.0$ は円環の開始点に戻ったことを示し、それは $h=1.0$ となる。ちなみに赤味70%と黄味30%で混色される色の色相は1.3である (ただし、この表記法は本論文に合わせた便宜的なものであり、実際のNCSではY70Rと記す。しかし、本質的には変わらない)。同一色相の色は、色相環の中心と円周の一点を結ぶ直線 (半径) 上に存在する。

彩度と明度に関しては、図1 (b) に示す正三角形 (色三角形) で表される。白(W)と黒(S)と完全色(C)が色三角形の頂点に配置される。他の中間色は、その色に含まれると感じられる白味、黒味、色味の構成比率からその色の位置が決定される。色三角形内の一点をPとすれば、点Pから各底辺に下ろした垂線の長さ w 、 s 、 c を、それぞれその合計値で割った値を改めて w 、 s 、 c とすれば

$$w+s+c=1 \quad (1)$$

であることから (実際のNCSでは、 $w+s+c=100$ の%単位が用いられる)、 w 、 s 、 c の値は点Pが定める色の白味、黒味、色味の構成比率を表している。従ってNCSでは、色空間における色配置を構成比率 w 、 s 、 c と色相 h の4要素の中の3要素を用いて決定することが出来る。その3要素の組を本論文では色座標と呼び、 (h, w, s) で表すことにする。

色相環面 (色円) を水平に、また彩度/明度面 (色三角形) を垂直に組み合わせた図1 (c) の算盤玉状の立体がNCSの色立体を形成する。従ってNCSを構成する全ての色は、この算盤玉状の色立体の内部または表面の一点に存在する。

2.3 ACSの基本色と色表現範囲

色空間に対するACSの色配置の方法は、図1に示すNCSと同じであり、式(1)に従って行われる。ACSの基本色もNCSと同様に赤、黄、緑、青、白、黒の6色である。それらはディスプレイ装置の3原色の赤、緑、青の混色によって再現する色を用いるが、ACSの基本有彩色には、NCSと同様、

ユニーク色相と同一色相の4色を当てることにする。そこで、それらの4色がCIE色度図のどの位置に存在するかを確定する必要がある。図2のCIE色度図に示すように、3原色の赤、緑、青の位置をR、G、B、またその赤と緑から合成される黄の位置をYとすると、装置が再現可能な色は、三角形RGBの内部に存在する色である。この色範囲をACSは対象とする。なお、3原色の赤、緑、青のCIE色度図上の位置は、ディスプレイ装置の発光体等の特性に多少依存する。

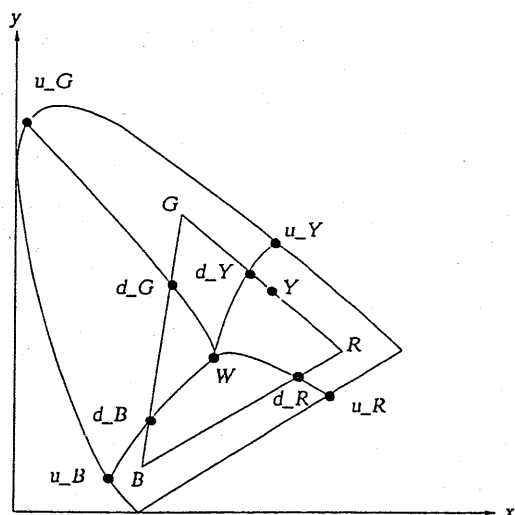


図2 ACSの基本色

図2における単色光軌跡と赤紫線の上に存在する赤、黄、緑、青の4つのユニーク色の位置をそれぞれ u_R 、 u_Y 、 u_G 、 u_B とし、このユニーク色と同一色相（ユニーク色相）の色を三角形RGBの底辺上に取り、その色の位置をそれぞれ d_R 、 d_Y 、 d_G 、 d_B とする。これらの色は、ユニーク色相を持つディスプレイ装置が再現する無数の色の中で、最も彩度（純度とも言う）の高い色である。これら4つの色は、単色光軌跡あるいは赤紫線の上に存在するユニーク色よりも彩度が低い、ディスプレイ装置が再現する色の中においては、ユニーク色に準ずる働きをするために、これらの色をdユニーク色（頭文字のdはディスプレイ画面上の色を意味するd）と呼ぶことにする。そして、dユニーク赤、dユニーク黄、dユニーク緑、dユニーク青と言え、それぞれ d_R 、 d_Y 、 d_G 、 d_B の4点で特定される色とする。この4つのdユニーク色がACSを構成する上での基本有彩色となる。

ところで、ユニーク色は各個人の色知覚によって異なるので、dユニーク色も各個人によって異なる。そこで、ACSを構成するためには、個人毎にユニーク色相を測定する必要がある、これによって基本有彩色となるdユニーク色のCIE色度図上の位置が確定する。また、三角形RGBの各底辺上の色は、それと同一色相に属するディスプレイ装置の再現する無数の色の中で、最も純度の高い色であり、これがACSの色相環の最外周の色を形成する。この色を高純度色と呼ぶことにする。

ACSの基本無彩色の白と黒には、ディスプレイ装置が再現する白および黒を用いる。そのCIE色度図上での位置は、ディスプレイ装置の発光体等の特性に多少依存する。なお、測色学的には等

エネルギースペクトル白色光は、CIE-xy色度座標で(1/3, 1/3)と定められており、図2ではそれは点Wで示された位置である。

2.4 ACSの構成手順

ACSは、各個人の色知覚に適合する表色系を電子的に実現しようとするものである。そのために、利用者にはディスプレイ装置を用いた3回の心理実験を課し、これらの実験データに基づいて個人向けの顕色系ACSが構成される。その構成手順を図3に掲げ、その概要を以下に述べる。

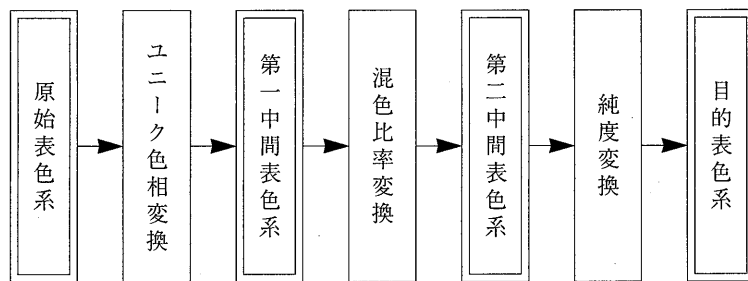


図3 ACS構成の手順

(a) 原始表色系・・・出発点の混色系

まず、ディスプレイ装置の3原色（赤、緑、黄）から、赤、黄、緑、青を基本有彩色、白と黒を基本無彩色を構成し、この基本色を混色とする原始表色系と呼ぶ単純な混色系を作成する。これがACS構成の出発点となる表色系である。この混色系の作成に際しては、筆者の導出した3原色と6基本色間の相互変換を行うための混色式／脱混色式を使用し、このときの混色の単位として、筆者の定めた色強度と呼ばれる単位およびその比率（混色比率）を用いる。これによる混色を測色的な混色と呼び、以降で述べる心理的な色混合と区別する。また、原始表色系をディスプレイ画面に出力する際には、ディスプレイ装置のガンマ補正や人間の眼の光に対するに生理反応（Stevensの法則）を考慮する必要がある。ここで述べた混色式／脱混色式、色強度、混色比率、ガンマ補正、Stevensの法則などの詳細や原始表色系の作成法については、筆者の論文（文献12）を参考にされたい。原始表色系が作成された後は、それを出発点として、数学的な変換により、順次、次に示す3つの表色系を創り出し、最終的に得られる表色系が目的の顕色系ACSである。

(b) 第一中間表色系・・・ユニーク色相変換による混色系

次に、原始表色系の4つの基本有彩色は、一般に利用者のユニーク色相には該当しないので、利用者にはユニーク色相測定のための心理実験を課す。その実験からdユニーク色を同定し、原始表色系をdユニーク色を基本有彩色とする第一中間表色系と呼ぶ混色系に数学的に変換する。この変換をユニーク色相変換と呼ぶ。

(c) 第二中間表色系・・・混色比率変換による顕色系

次に、利用者にはカラーネーミング法を用いた色の見えに関する心理実験を課す。この実験を通して、色の見えを定める混色比率変換関数と呼ぶ関数を決定する。この関数を用いて、測色的な混色から成る第一中間表色系を心理的な色混合から構成される顕色系に数学的に変換する。この顕色系を第二中間表色系と呼び、この変換を混色比率変換と言う。

(d) 目的表色系・・・純度変換による顕色系

さらに、図2に示した三角形RGBの底辺上に位置する色、すなわち高純度色について、カラーネーミング法を用いた色の見えに関する心理実験を利用者に課す。この実験を通して、高純度色の白味と黒味の割合を定める純度変換関数と呼ぶ関数を決定する。(場合によっては、さらに基本無彩色における白の純粹白味と黒の純粹黒味の割合を定める白黒純度変換関数も決定する)。この関数を用いて第二中間表色系に数学的変換を施し、最終的に目的表色系と呼ぶ顕色系ACSを構成する。これによって、利用者がディスプレイ装置の再現色を知覚するときの色空間における色立体が決定する。この色立体がACSの色立体であり、それはNCSの色立体の部分となっている。この変換を純度変換と呼ぶ。

* * *

このようにACSは3つの心理実験を介して、利用者の色知覚に適合する表色系へと進化する。すなわち、ACSは、利用者のdユニーク色を基本有彩色とし、利用者の感ずる白味と黒味と色味に従った色配置による表色系となるのである。

3. ユニーク色相変換

3.1 ユニーク色相変換の原理

原始表色系は、ディスプレイ装置の再現する赤、黄、緑、青、白、黒の6基本色の混色によって作成されるので⁽¹²⁾、一般にその基本有彩色が利用者のユニーク色相に一致している訳ではない。そこで、原始表色系の高純度色の中から利用者のユニーク色相に合致するdユニーク色を心理実験から見出し、そのdユニーク色が第一中間表色系の基本有彩色になるように、原始表色系にユニーク色相の変換操作を施す必要がある。その変換原理は次の通りである。

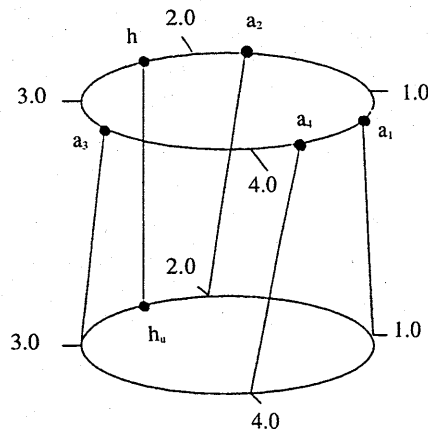


図4 ユニーク色相変換

原始表色系において高純度色のユニーク色相を測定し、そこからdユニーク赤、dユニーク黄、dユニーク緑、dユニーク青の色相を決定する。そして、その色相を図4に示す上部の円環（色相環）の値（ a_1, a_2, a_3, a_4 ）とする。また、図4の下部の円環を第一中間表色系の色相環とする。例えば、原始表色系の黄緑領域における任意の色相をh、第一中間表色系におけるその領域の色相を h_a とする

と、 h から h_u への変換は、それぞれの円環の円弧の長さに関する次の比例式から求められる。

$$a_3 - h : h - a_2 = 3.0 - h_u : h_u - 2.0 \quad (2)$$

h_u について式を解くと

$$h_u = \{1.0 / (a_3 - a_2)\} (h - a_2) + 2.0 \quad (3)$$

となる。

このような変換を一般化しよう。色相 h は $1.0 \leq h \leq 4.999 \dots$ の範囲であり、 $h = 5.0$ で $h = 1.0$ に戻ることを考慮して、まずユニーク赤の色相 a_1 の値の範囲によって、以下の①または②のブロックを選択し、次にそのブロック中で h の値の範囲によって、添字 i と j および定数 n を決定する。そして、その値を用いて、③のブロック中の変換式を計算する。

① $1.0 \leq a_1 < 2.0$ のとき、 $a_5 = a_1 + 4.0$ とし、もしそのとき、 $1.0 \leq h < a_1$ ならば、 $h_x = h + 4.0$ とし、そうでなければ、 $h_x = h$ とする。そして、 h_x が満たす以下の不等式を選択し、対応する i と j および n の値を定める。

$$a_1 \leq h_x \leq a_2 \quad \Rightarrow \quad i=1, j=2, n=1$$

$$a_2 \leq h_x \leq a_3 \quad \Rightarrow \quad i=2, j=3, n=2$$

$$a_3 \leq h_x \leq a_4 \quad \Rightarrow \quad i=3, j=4, n=3$$

$$a_4 \leq h_x < a_5 \quad \Rightarrow \quad i=4, j=5, n=4$$

② $4.0 < a_1 < 5.0$ のとき、 $a_0 = a_1 - 4.0$ とし、もしそのとき、 $a_1 \leq h < 5.0$ ならば、 $h_x = h - 4.0$ とし、そうでなければ、 $h_x = h$ とする。そして、 h_x が満たす以下の不等式を選択し、対応する i と j および n の値を定める。

$$a_0 < h_x \leq a_2 \quad \Rightarrow \quad i=0, j=2, n=1$$

$$a_2 \leq h_x \leq a_3 \quad \Rightarrow \quad i=2, j=3, n=2$$

$$a_3 \leq h_x \leq a_4 \quad \Rightarrow \quad i=3, j=4, n=3$$

$$a_4 \leq h_x \leq a_1 \quad \Rightarrow \quad i=4, j=1, n=4$$

③ 添字 i と j が定めるユニーク色相の値 a_i と a_j および変換する色相 h_x を次の式

$$h_u = \{1 / (a_j - a_i)\} (h_x - a_i) + n \quad (4)$$

に代入して、変換された色相 h_u を求める。 a_i と a_j には4つのユニーク色相の測定値(a_1, a_2, a_3, a_4)の2つを用いる。

*

*

*

原始表色系からdユニーク色を基本有彩色とする第一中間表色系への変換は、このような簡単な線形変換によって行う。このユニーク色相変換によって、第一中間表色系の基本有彩色を利用者のユニーク色相に一致するので、原始表色系の任意の色相 h は、第一中間表色系の色相 h_u に変換することが出来る。

3.2 ユニーク色相測定の実験方法

ユニーク色相を測定するための実験方法を具体的に説明する。dユニーク赤を測定する例を取り上げる。図5に示すように、コンピュータ・プログラムは、ディスプレイ画面に原始表色系を用いて作られた1つの色帯を表示する。色帯には、左端に原始表色系の青、右端に同様の黄を配置し、その間に、青と黄の混色比率が連続的に変化する色スペクトルを配置する。それは高純度色から構成される色スペクトルであり、その中に被験者の同定すべきdユニーク赤が存在するのである。

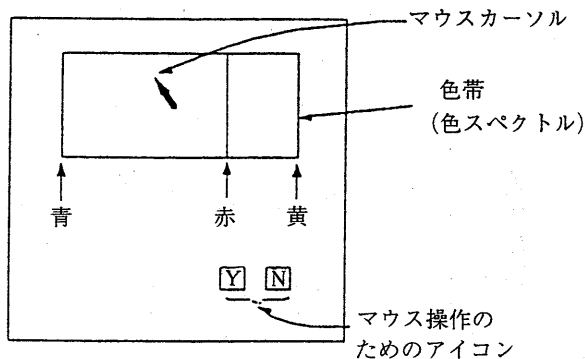


図5 ユニーク色相測定実験の画面

被験者は色スペクトルを眺め、その中で青味もなく黄味もないように知覚される色、すなわちユニーク赤と同じ色相であるdユニーク赤の位置をマウスで指定する。プログラムは、被験者の知覚するユニーク赤の色相を測定する。そして、この色帯について複数回実験を行い、その色相の平均値 a_1 を求める。これにより、被験者の原始表色系におけるユニーク赤の色相が求められる。

プログラムはこのような測定を他のスケルトン色帯（赤－黄－緑、黄－緑－青、緑－青－赤の色帯）についても行い、原始表色系におけるdユニーク黄、dユニーク緑、dユニーク青の色相の平均値 a_2 、 a_3 、 a_4 を求める。dユニーク色の色相(a_1 , a_2 , a_3 , a_4)が求まると、式(4)を用いてユニーク色相変換を行うことが出来る。なお、スケルトン色帯の意味は、4.1.2項で述べる。

4. 混色比率変換の原理

4.1 混色比率変換関数

4.1.1 混色比率変換関数の設定

混色系の第一中間表色系は、その基本有彩色が利用者のユニーク色相に合致した表色系ではあるが、利用者の知覚する白味、黒味、色味の割合に従って色配置された表色系にはなっていない。そこで、利用者の色知覚に見合った様式で色の再配置を行い、顕色系の第二中間表色系を構成する必要がある。これを行うには色の見えに関する心理実験を必要とする。この色の見えとは、第一中間表色系で定まっている6基本色（ユニーク色相に一致した赤、黄、緑、青および白と黒）の間で2色を取り出した2色混合色の白味、黒味、色味の割合についてである。

具体的に言えば、図6に示すように、例えば赤と黄の基本有彩色の測色的な2色混色によって構成した色スペクトル帯（赤－黄色帯）のある特定の色に対して、その基本色の心理的な混合割合がいくらかをカラーネーミング法を用いて言う。この割合を心理的色構成比率と呼ぶ。このとき、その比率の決め方として、心の中で経験的に感じ取ってきた純粋な赤味、黄味、緑味、青味の各色（ユニーク色）および純粋に黒味の色（光の全く存在しない暗黒と感じる色）と純粋に白味の色（色味と黒味が全く知覚されないと感じる色）を知覚上の基準色とする。例えばある特定の色に対してその基本色が半分の割合で混ざっていると知覚したならば、基本色のその当該色に対する心理的色構成比率を0.5（50%）とするのである。

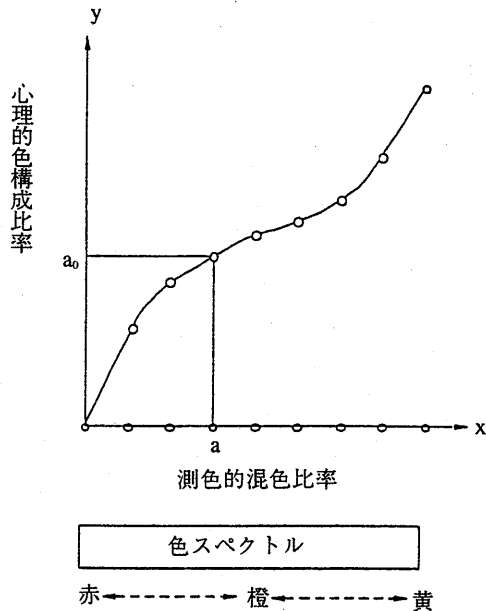


図6 混色比率変換関数

色スペクトル帯を構成する2色混色の測色的な比率を測色的混色比率と呼ぶ。この比率に対する心理的色構成比率を定める関数を決定するのが、利用者に課すところの色の見えに関する心理実験であり、これによって心理的色構成比率を測定する。この関数を混色比率変換関数と呼ぶ(*)。例えば図6に示すように、赤黄色帯におけるある特定の色に対して、基本有彩色の黄の測色的混色比率を a 、ユニーク黄の主観的な混合比率すなわち心理的色構成比率を a_0 とすれば、混色比率変換関数は

$$a_0 = F_{yr}(a) \quad (5)$$

と定められる。 F_{yr} が黄の赤に対する混色比率変換関数である。

なお本項の最後に、第一中間表色系を基にして利用者の色の見えに適合する第二中間表色系を構成する方法として、本論文で述べる混色比率変換関数以外にニューラルネットを用いる方法も考えられるので、その点に言及しておく。混色系の第一中間表色系から顕色系の第二中間表色系を構成することは、前者の測色的な色座標を後者の心理的な色座標に変換する問題と等価である。第一中間表色系の測色的色座標 (h, w, s) から第二中間表色系の心理的色座標 (h_0, w_0, s_0) へ変換を行う式を $h_0 = F_h(h, w, s)$ 、 $w_0 = F_w(h, w, s)$ 、 $s_0 = F_s(h, w, s)$ と記述しよう。 F_h 、 F_w 、 F_s の関数を求めるには、第一中間表色系の色空間において複数の代表点 (h, w, s) を選び、その点の心理的に感じられる色座標 (h_0, w_0, s_0) をカラーネーミング法によって測定し、ニューラルネットワークを用いて同定する方法が考えられる。

(*) 色スペクトルは、ファジィ理論においては典型的なファジィ事象である。この事象はメンバーシップ関数と呼ばれる関数で記述れるが、その関数は主観的に決定される。従って、本論文で示す混色比率変換関数は、ファジィ理論におけるメンバーシップ関数に対応するものである。

しかし、この方法では、労力の要する心理実験が必要とされる。と言うのは、非常に数多くの代表点に対する実験データを得なければならないからである。このような心理実験を利用者に課すのは、実用的な立場からすると不適当である。また、ニューラルネットワークは一般に多大な計算時間が必要とされる。そこで、実験データが比較的少なくまた計算時間も少ししか必要としないで、表色系を生成することが出来る数理モデルが要求される。そのモデルを構成する主要部分が本章で述べる混色比率変換である。

4.1.2 混色比率変換関数の種類

ACSを構成するために必要な混色比率変換関数は、第一中間表色系の色空間の表面最外周に存在する4色の基本有彩色（赤、黄、緑、青）、およびその空間の上下の2頂点の2色の基本無彩色（白、黒）の混色から生成される色帯に基づいて作成される。この色帯をスケルトン（骨組み）色帯と呼ぶことにするが、それはその表色系の表面の高純度色に関するスケルトン色帯およびその内部の無彩色に関するスケルトン色帯である。その具体的なスケルトン色帯は2色の基本色同士を混色とする赤－黄、黄－緑、緑－青、青－赤、赤－白、黄－白、緑－白、青－白、赤－黒、黄－黒、緑－黒、青－黒、白－黒の13色帯であり、図7にそれらを示す。利用者に心理実験を課すことにより、これらの色帯に関する混色比率変換関数が決定する。従って、ACSの表色系を創り出す働きの1つである混色比率変換は、混色系の第一中間表色系の色空間の表面と内部に存在するスケルトン色帯に関する混色比率変換関数の非線形的特性に基づいて、その表面と内部の色を再配置し、顕色系の第二中間表色系を構成するのである。

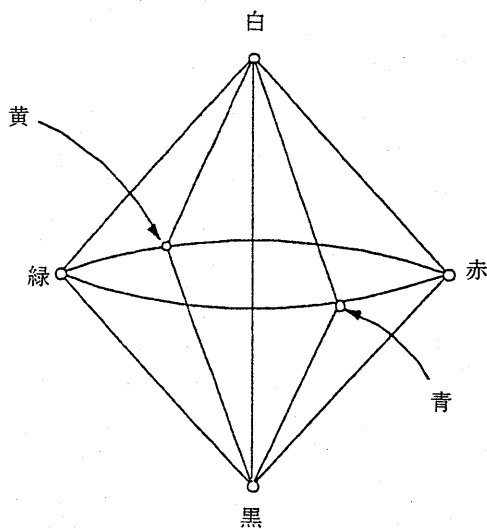


図7 スケルトン色帯

4.1.3 混色比率変換関数の正規化

白あるいは黒と基本有彩色の2色混色に関する混色比率変換関数は、測色的混色比率に対してユニーク色を基準にしたときの心理的色構成比率を定める関数であるので、その値を実験的に求めた場合には、図8に示すように最大値は一般に1.0未満の値である。というのは、測色的混色比率

が1.0のとき、そのときの色がユニーク色ただ1色の色味のみから成ると知覚されるのであれば、関数の最大値は理論的に1.0となるが、しかし、第一中間表色系の基本有彩色は、2.3節で述べたように、ユニーク色よりも純度が低く、一般には若干の白味と黒味を含んでいると知覚されるので、関数の最大値は1.0未満と測定されるのである。第一中間表色系の基本有彩色はこのような性質の色である。従って白または黒と基本有彩色の混色から構成される色味に関する心理的色構成比率は一般には0.0から1.0未満の間の値として知覚されるのである。

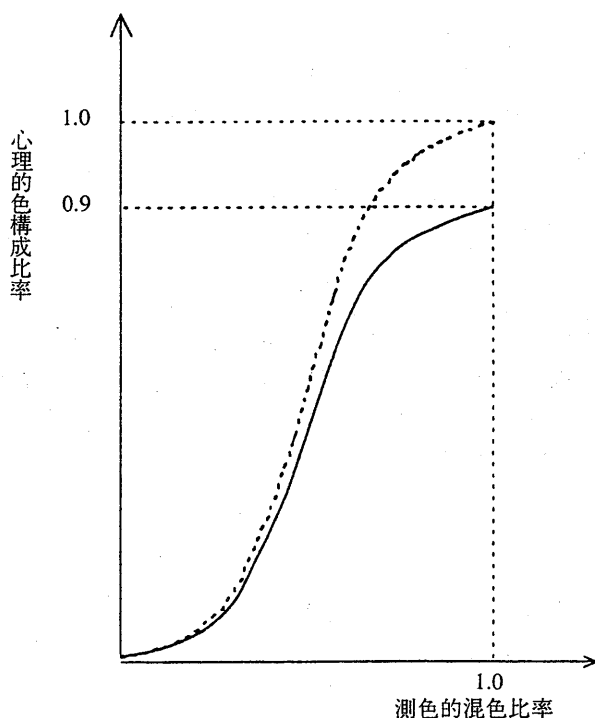


図8 混色比率変換関数の正規化

混色比率変換においては、関数は正規化（関数値の最大値が1.0になるように、比例的に基準化すること）されていることが条件である。そこで、心理実験で得られた関数の最大値が1.0未満の場合には、すべての関数に対して正規化を施すものとする。図8の点線が正規化された混色比率変換関数である。これにより数式を取り扱う上では、利用者は基本有彩色に含まれていると感じる白味と黒味を仮想的に色味として知覚することになる。なお、最終的な結果を得るには脱正規化を行い、この仮想の色味を除去する必要があるが、それについては第6章の純度変換において述べる。

また、基本無彩色の黒と白に関する混色比率変換関数の決定に際しても、実験条件によっては被験者にとって白味100%、黒味100%の色は知覚されず、関数の最大値が1.0未満となり、最小値が0.0に達しないということも想定される。このような場合にも、白味と黒味の色構成比率がともに0.5となる点を基準点として最大値が1.0、最小値が0.0となるような正規化を行い、その後に脱正規化を行う必要があるが、これについては6.1.2項で述べる。

4.2 色三角形における心理的色構成比率の導出

第一中間表色系の測色的色座標 (h, w, s) を持つ赤黄領域における色を例として取り上げる。この領域の色は、赤、黄、白、黒の4色の基本色の混色によって作られる。 h は色相であり、それは3.1節のユニーク色相変換によって定められた h_0 である（すなわち h には3.1節で求めた h_0 を用いる）。 w と s は、その色を構成する基本無彩色の白と黒の測色的混色比率である。その色の基本有彩色の赤と黄の測色的混色比率を r, y とし、次の値を定める。

$$n = \text{int}(h) \quad (6)$$

$$u_{yr} = \text{dec}(h) = y/(r+y) \quad (7)$$

$$v_{sw} = s/(w+s) \quad (8)$$

$$c = r+y \quad (9)$$

$$d = w+s \quad (10)$$

$$c+d=1 \quad (11)$$

式(6)の int 関数と式(7)の dec 関数はそれぞれ、色相 h の整数部分の数 n と小数部分の数 u を求める関数である。なお、2色間の混色比率 u や v に付けられた2つの文字から構成される1組の添字は、混色された2色の種類を示し、後の添字の示す色に対する前の添字の示す色の混色比率であることを示す。

4.2.1 心理的指標の導入

まず最初に第二中間表色系における白味、黒味、赤黄の色味の心理的色構成比率 (w_0, s_0, c_0) を求めよう。図1(b)の色三角形WSCにおいて、第一中間表色系の2色間での混色比率を示す測色的指標 (v_{sw}, p_{cw}, p_{cs}) を導入し、 p_{cw}, p_{cs} を次のように定義する (v_{sw} は式(8)で定義済み)。

$$p_{cw} = c/(c+w) \quad (12)$$

$$p_{cs} = c/(c+s) \quad (13)$$

v_{sw} は式(8)から白と黒における黒、 p_{cw} は式(12)から赤黄混合色と白における赤黄混合色、 p_{cs} は式(13)から同じく赤黄混合色と黒における赤黄混合色、の各測色的混色比率を表す。この指標から心理的指標 $(v_{0sw}, p_{0cw}, p_{0cs})$ を得るには、それぞれ2色混色（赤黄混合色を1色と数える）における測色的混色比率から心理的色構成比率へ変換する混色比率変換関数を用意する。この変換関数を F_{sw}, F_{cw}, F_{cs} とすれば、変換された心理的指標は

$$v_{0sw} = F_{sw}(v_{sw}) \quad (14)$$

$$p_{0cw} = F_{cw}(p_{cw}) \quad (15)$$

$$p_{0cs} = F_{cs}(p_{cs}) \quad (16)$$

で求められる。ところで、赤から黄までの範囲の赤黄混合色は無数に存在するので、それらに対する全ての F_{cw} および F_{cs} 関数を実験に求めることは現実的でない。そこで、次のように、白赤混色に対する赤、白黄混色に対する黄、黒赤混色に対する赤、黒黄混色に対する黄、のそれぞれ2色混色の測色的混色比率（これらはスケルトン色帯に関する測色的混色比率である）を心理的色構成比率に変換する混色比率変換関数 $F_{rw}, F_{yw}, F_{rs}, F_{ys}$ を導入する。その関数は心理実験から定めることにする。そして、これらの関数を用いて、心理的指標 p_{0cw}, p_{0cs} は次の式から求めることにする。

$$p_{0cw} = F_{rw}(p_{cw})(1-u_{yr}) + F_{yw}(p_{cw})u_{yr} \quad (17)$$

$$p_{0cs} = F_{rs}(p_{cs})(1-u_{yr}) + F_{ys}(p_{cs})u_{yr} \quad (18)$$

図9に混色比率変換関数の一覧を示す。この図から分かるように、例えば式(17)では、色相が

赤に近くなれば、 u_{yr} の値は0に近くなるので、関数 F_{rw} の寄与が大きくなり、色相が黄に近くなれば、 u_{yr} の値は1に近くなるので、関数 F_{rw} の寄与は小さくなる。なお、例えば式(17)は、このような関係を満たす次の比例式

$$F_{yw}(p_{cw}) - F_{rw}(p_{cw}) : F_{yw}(p_{cw}) - p_{ocw} = 1 : 1 - u_{yr} \quad (19)$$

から求めることが出来る。

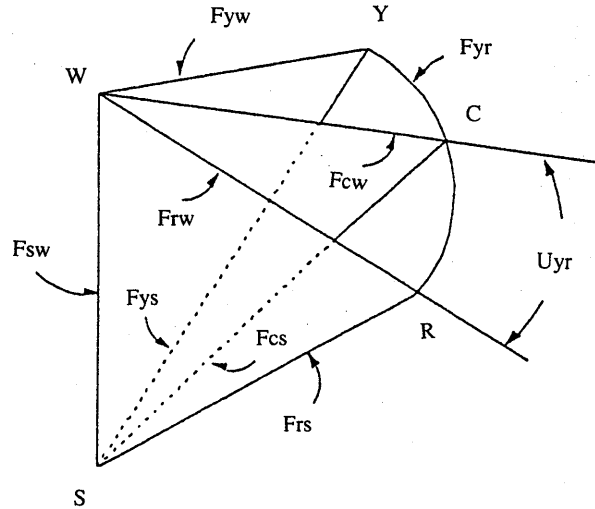


図9 混色比率変換関数の一覧図

4.2.2 心理的色構成比率の導出

まず、心理的指標 (v_{0sw} , p_{ocw} , p_{ocs}) から第二中間表色系の心理的色構成比率 (w_0 , s_0 , c_0) を算定する2つの近似的な方法を示す。

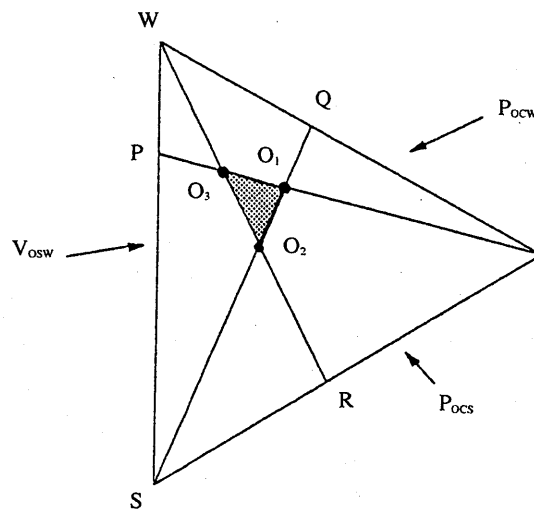


図10 3交点平均法

(1) 3交点平均法

図10の色三角形WSCにおいて、頂点Cから以下の式を満たすように底辺WSに線を下ろし、その交点をPとする。

$$PW/(PS+PW)=v_{0sw} \quad (20)$$

また、同様に頂点Sと頂点Wから、以下の式を満たすように底辺WC、底辺SCに線を下ろし、その交点をそれぞれQ、Rとする。

$$QW/(QW+QC)=p_{0cw} \quad (21)$$

$$RS/(RS+RC)=p_{0cs} \quad (22)$$

線分PCと線分QSの交点O₁における色構成比率を (w₀₁, s₀₁, c₀₁) とすると、それは、式 (20) と式 (21) から導いた

$$s_{01}/(w_{01}+s_{01})=v_{0sw} \quad (23)$$

$$c_{01}/(c_{01}+w_{01})=p_{0cw} \quad (24)$$

と

$$w_{01}+s_{01}+c_{01}=1 \quad (25)$$

の3元連立方程式の解として求められる。

同様に、線分QSと線分RWの交点O₂における色構成比率を (w₀₂, s₀₂, c₀₂) とすると、それは

$$c_{02}/(c_{02}+w_{02})=p_{0cw} \quad (26)$$

$$c_{02}/(c_{02}+s_{02})=p_{0cs} \quad (27)$$

$$w_{02}+s_{02}+c_{02}=1 \quad (28)$$

の解として、また、線分RWと線分PCの交点O₃における色構成比率を (w₀₃, s₀₃, c₀₃) とすると、それは

$$c_{03}/(c_{03}+s_{03})=p_{0cs} \quad (29)$$

$$s_{03}/(w_{03}+s_{03})=v_{0sw} \quad (30)$$

$$w_{03}+s_{03}+c_{03}=1 \quad (31)$$

の解として、それぞれ求められる。

このことは、利用者はある特定の色に関する1組の心理的指標 (v_{0sw}, p_{0cw}, p_{0cs}) を通して、結果として3つの色 (図10における3つの交点の示す色) を知覚したことになる。これは知覚心理実験では避けられない主観的な曖昧さの現れである。主観的な曖昧さが生じない理想的な測定が成立したと仮定した場合には、w₀₁=w₀₂=w₀₃、s₀₁=s₀₂=s₀₃、c₀₁=c₀₂=c₀₃となる。このような色知覚が成り立つ条件は、当然、図10において点O₁、点O₂、点O₃が一点で重なることである。このとき、色三角形WSCにチェバの定理(*)を適用し、その三角形が正三角形であることを考慮すると、心理的指標 (v_{0sw}, p_{0cw}, p_{0cs}) の要素間では

$$v_{0sw}*(1-p_{0cw})*p_{0cs}=(1-v_{0sw})*p_{0cw}*(1-p_{0cs}) \quad (32)$$

なる関係が成立しなければならない。しかし、利用者にとってこのような関係が成立するような色知覚を行うことは至難の業であり、実際的には主観的な曖昧さが生じ、w₀₁≠w₀₂≠w₀₃、s₀₁≠s₀₂≠s₀₃、c₀₁≠c₀₂≠c₀₃となってしまう。

そこでこの心理実験の曖昧さを踏まえて、利用者の知覚する色は、図10に示す色三角形WSCの

(*) 任意の三角形WSCの内部の一点をOとし、線分COの延長と底辺WS、線分SOの延長と底辺WC、線分WOの延長と底辺SC、のそれぞれの交点をP、Q、Rとすると、(PW/PS)(QC/QW)(RS/RC)=1が成立する。またその逆も成立する。

中の三角形 $O_1O_2O_3$ の領域内のある点 O_0 に存在すると仮定する。その色の色構成比率は、 w_{01} と w_{02} と w_{03} 、 s_{01} と s_{02} と s_{03} 、 c_{01} と c_{02} と c_{03} の平均をもって定めるのが妥当である。結局、第二中間表色系の心理的色構成比率 (w_0, s_0, c_0) は、式 (23) ~ 式 (25) の解、式 (26) ~ 式 (28) の解、式 (29) ~ 式 (31) の解を用いて

$$\begin{aligned} w_0 &= (w_{01} + w_{02} + w_{03})/3 \\ &= \{(1 - v_{0sw})(1 - p_{0cw}) / (1 - v_{0sw} * p_{0cw}) \\ &\quad + p_{0cs}(1 - p_{0cw}) / (p_{0cs} - p_{0cs} * p_{0cw} + p_{0cw}) \\ &\quad + (1 - v_{0sw})(1 - p_{0cs}) / (1 + v_{0sw} * p_{0cs} - p_{0cs})\} / 3 \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} s_0 &= (s_{01} + s_{02} + s_{03})/3 \\ &= \{v_{0sw}(1 - p_{0cw}) / (1 - v_{0sw} * p_{0cw}) \\ &\quad + p_{0cw}(1 - p_{0cs}) / (p_{0cs} - p_{0cs} * p_{0cw} + p_{0cw}) \\ &\quad + v_{0sw}(1 - p_{0cs}) / (1 + v_{0sw} * p_{0cs} - p_{0cs})\} / 3 \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} c_0 &= (c_{01} + c_{02} + c_{03})/3 \\ &= \{(1 - w_{01} - s_{01}) + (1 - w_{02} - s_{02}) + (1 - w_{03} - s_{03})\} / 3 \\ &= 1 - w_0 - s_0 \end{aligned} \quad (35)$$

と定めるものとする。この方法は3つの交点 (解) の値を平均する方法から、3交点平均法と呼ぶ。

(2) 色量変化平均法

利用者が第一中間表色系の測色的混色比率 (w, s, c) によって定められる色を、図1(b)に示す色三角形の底辺WSから眺めると、利用者は白味と黒味をそれぞれ

$$w_{01} = (w + s)(1 - v_{0sw}) \quad (36)$$

$$s_{01} = (w + s)v_{0sw} \quad (37)$$

と計算されるような色構成比率で知覚することになる。また、式 (36) と式 (37) から

$$w_{01} + s_{01} = w + s \quad (38)$$

の関係が導かれるので、そのとき色味の色構成比率は

$$c_{01} = 1 - w_{01} - s_{01} = 1 - w - s = c \quad (39)$$

と変化がないので、このとき、利用者は白味と黒味の量だけが変化したと知覚する。また、この関係から、式 (23) と同じ

$$s_{01} / (w_{01} + s_{01}) = v_{0sw} \quad (40)$$

が成立する。

このことを幾何学的に説明する。図11の色三角形WSCの内部に測色的混色比率 (w, s, c) の定める点Oを取り、点Oを通り底辺WSに平行な線を引き、底辺WCと底辺SCの交点をそれぞれ W_1 、 S_1 とする。式 (38) と式 (40) の関係を満たすような点 O_1 を線分 W_1S_1 上を取る。この点は三角形 W_1S_1C が正三角形であることから必ず存在する。このような訳で、利用者が底辺WSから知覚した色構成比率 (w_{01}, s_{01}, c_{01}) の色は、線分 W_1S_1 の O_1 点に存在する色である。

同様に、色三角形WSCの底辺WCからは

$$w_{02} = (c + w)(1 - p_{0cw}) \quad (41)$$

$$s_{02} = s \quad (42)$$

$$c_{02} = (c + w)p_{0cw} \quad (43)$$

と計算され、式 (41) と式 (43) から

$$w_{02} + c_{02} = w + c \quad (44)$$

が得られる。このとき、利用者は白味と色味の量だけが変化したように知覚する。この関係から、式 (26) と同じ

$$c_{02} / (c_{02} + w_{02}) = p_{0cw} \quad (45)$$

が得られる。図11において式 (41) ~ 式 (43) で表される色構成比率の色が存在する線分 W_2C_1 (これは点Oを通り底辺WCに平行な線分) 上の点を O_2 とすると、その点 O_2 は式 (44) と式 (46) の関係を満たす。

また、底辺SCからは

$$w_{03} = w \quad (46)$$

$$s_{03} = (c + s) (1 - p_{0cs}) \quad (47)$$

$$c_{03} = (c + s) p_{0cs} \quad (48)$$

と計算され、式 (47) と式 (48) から

$$s_{03} + c_{03} = c + s \quad (49)$$

が得られる。このとき、利用者は黒味と色味の量だけが変化したように知覚する。この関係から、式 (29) と同じ

$$c_{03} / (c_{03} + s_{03}) = p_{0cs} \quad (50)$$

が得られる。図11において式 (46) ~ 式 (48) で表される色構成比率の色が存在する線分 S_2C_2 (これは点Oを通り底辺SCに平行な線) 上の点を O_3 とすると、その点 O_3 は式 (49) と式 (50) の関係を満たす。

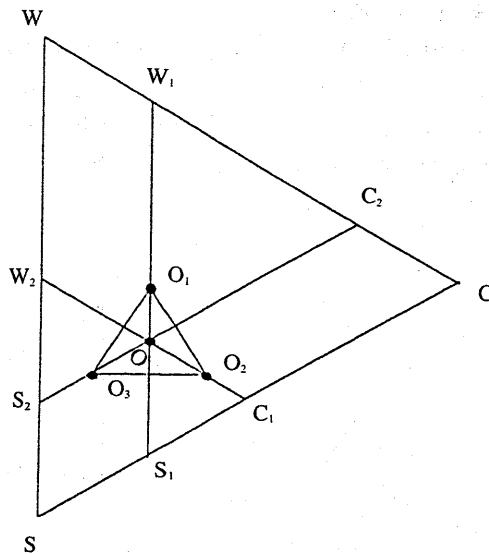


図11 色量変化平均法

ところで、利用者が3方向からの知覚した色構成比率は、前項 (1) で述べたように、一般に $w_{01} \neq w_{02} \neq w_{03}$ 、 $s_{01} \neq s_{02} \neq s_{03}$ 、 $c_{01} \neq c_{02} \neq c_{03}$ となる。そこで、利用者は3方向からの色構成比率を平均した色を知覚したものと仮定し、そのような色は、図11に示す色三角形WSCの中の三角形 $O_1O_2O_3$ の領域内のある点 O_0 に存在するとする。その色の色構成比率 (w_0 , s_0 , c_0) は、 w_{01} と w_{02} と

w_{03} 、 s_{01} と s_{02} と s_{03} 、 c_{01} と c_{02} と c_{03} の平均をもって定めるのが妥当である。結局、それらの比率は、式(36)～式(39)、式(41)～式(43)、式(46)～式(48)を用いて

$$w_0 = (w_{01} + w_{02} + w_{03})/3 \\ = \{(w+s)(1-v_{0sw}) + (w+c)(1-p_{0cw}) + w\}/3 \quad (51)$$

$$s_0 = (s_{01} + s_{02} + s_{03})/3 \\ = \{(w+s)v_{0sw} + s + (c+s)(1-p_{0cs})\}/3 \quad (52)$$

$$c_0 = (c_{01} + c_{02} + c_{03})/3 \\ = \{c + (w+c)p_{0cw} + (c+s)p_{0cs}\}/3 \quad (53)$$

から定めるものとする。導出された白味、黒味、色味の色構成比率は

$$w_0 + s_0 + c_0 = w + s + c = 1 \quad (54)$$

の関係にあることから、それは第二中間表色系の心理的色構成比率(w_0, s_0, c_0)とすることが出来る。この方法を、色量の変化を平均することから、色量変化平均法と呼ぶ。

* * *

3交点平均法と色量変化平均法は、ともに心理的色構成比率を求める近似的な方法であり、どちらも本質的には同じ考え方である。しかし、数値実験によると、3交点平均法の方が色量変化平均法よりも混色比率変換関数の非線形性の度合いに敏感に反応して、より大きく変化する心理的色構成比率を作り出す。どちらの方法がより良いかどうかについては、最終的に電子色見本を作成し、そのときの利用者の心理的な満足度によって決定する。

4.3 色相環における心理的色相の導出

次に第二中間表色系の心理的色相 h_0 を求めよう。これは4.2節で心理的色構成比率(w_0, s_0, c_0)を得た場合と同様な方法によって得られる。というのは、図12(a)に示す赤黄領域を構成する色相環の4分円は、図12(b)に示す赤、黄、白黒混合色(灰色:Dで表す)をその頂点に配した色三角形と等価な数学的性質を持つからである。赤、黄、白黒混合色を4.2節で述べた白、黒、赤黄混合色にそれぞれ対応させると

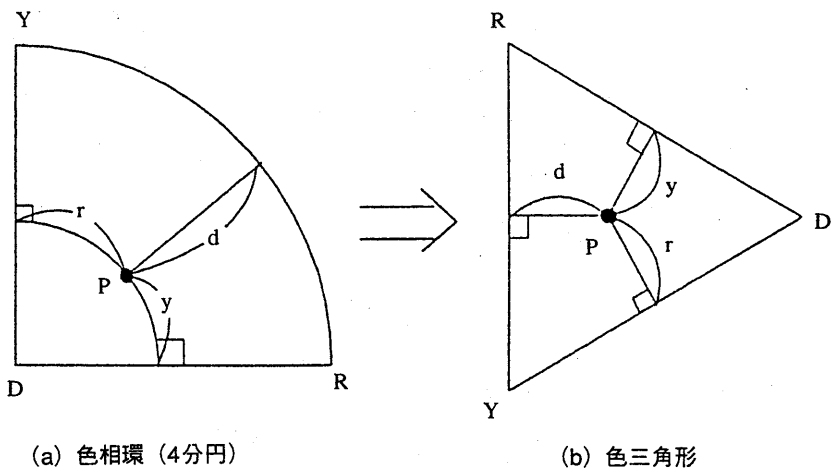


図12 色相環の色三角形への変換

$$u_{0yr} = F_{yr}(u_{yr}) \quad (55)$$

$$q_{dr} = d/(r+d) \quad (56)$$

$$q_{dy} = d/(y+d) \quad (57)$$

$$q_{0dr} = F_{wr}(q_{dr})(1-v_{sw}) + F_{sr}(q_{dr})v_{sw} \quad (58)$$

$$q_{0dy} = F_{wy}(q_{dy})(1-v_{sw}) + F_{sy}(q_{dy})v_{sw} \quad (59)$$

となる。 u_{yr} は式(7)の色相から求められ、混色比率変換関数 F_{yr} は赤黄混色に対する黄の心理的色構成比率を定めるものであり、式(58)の q_{0dr} と式(59)の q_{0dy} はそれぞれ、式(17)と式(18)に対応するものである。ここで

$$q_{rd} = 1 - q_{dr} \quad (60)$$

$$q_{yd} = 1 - q_{dy} \quad (61)$$

なる測色的混色比率を導入すると、混色比率変換関数の間で

$$F_{wr}(q_{dr}) + F_{rw}(q_{rd}) = 1 \quad (62)$$

$$F_{wy}(q_{dy}) + F_{yw}(q_{yd}) = 1 \quad (63)$$

$$F_{sr}(q_{dr}) + F_{rs}(q_{rd}) = 1 \quad (64)$$

$$F_{sy}(q_{dy}) + F_{ys}(q_{yd}) = 1 \quad (65)$$

なる関係式が成立するので、式(58)と式(59)は、4.2節と同様にスケルトン色帯に関する混色比率変換関数 F_{rw} 、 F_{rs} 、 F_{yw} 、 F_{ys} を用いて、次のように書き換えられる。

$$q_{0dr} = \{1 - F_{rw}(q_{rd})\}(1 - v_{sw}) + \{1 - F_{rs}(q_{rd})\}v_{sw} \quad (66)$$

$$q_{0dy} = \{1 - F_{yw}(q_{yd})\}(1 - v_{sw}) + \{1 - F_{ys}(q_{yd})\}v_{sw} \quad (67)$$

そこで、利用者が知覚する心理的色構成比率(r_0 , y_0 , d_0)は、4.2節の場合と同様な方法によって求める。3交点平均法では

$$\begin{aligned} r_0 &= (r_{01} + r_{02} + r_{03})/3 \\ &= \{(1 - u_{0yr})(1 - q_{0dr})/(1 - u_{0yr} * q_{0dr}) \\ &\quad + q_{0dy}(1 - q_{0dr})/(q_{0dy} - q_{0dy} * q_{0dr} + q_{0dr}) \\ &\quad + (1 - u_{0yr})(1 - q_{0dy})/(1 + u_{0yr} * q_{0dy} - q_{0dy})\}/3 \end{aligned} \quad (68)$$

$$\begin{aligned} y_0 &= (y_{01} + y_{02} + y_{03})/3 \\ &= \{u_{0yr}(1 - q_{0dr})/(1 - u_{0yr} * q_{0dr}) \\ &\quad + q_{0dr}(1 - q_{0dy})/(q_{0dy} - q_{0dy} * q_{0dr} + q_{0dr}) \\ &\quad + u_{0yr}(1 - q_{0dy})/(1 + u_{0yr} * q_{0dy} - q_{0dy})\}/3 \end{aligned} \quad (69)$$

$$\begin{aligned} d_0 &= (d_{01} + d_{02} + d_{03})/3 \\ &= \{(1 - r_{01} - y_{01}) + (1 - r_{02} - y_{02}) + (1 - r_{03} - y_{03})\}/3 \\ &= 1 - r_0 - y_0 \end{aligned} \quad (70)$$

が得られる。また、色量変化平均法では

$$r_0 = \{(r+d)(1-q_{0dr}) + r + (r+y)(1-u_{0yr})\}/3 \quad (71)$$

$$y_0 = \{y + (y+d)(1-q_{0dy}) + (r+y)u_{0yr}\}/3 \quad (72)$$

$$d_0 = \{(r+d)q_{0dr} + (y+d)q_{0dy} + d\}/3 \quad (73)$$

となる。第二中間表色系における心理的色相 h_0 は、いずれも

$$h_0 = n + y_0/(r_0 + y_0) \quad (74)$$

として求められる。ただし、 n は式(6)から定められる。最終的には、式(33)、式(34)、式(74)の組、または式(51)、式(52)、式(74)の組から第二中間表色系の心理的色座標(h_0 , w_0 , s_0)が得

られる。なお、式 (35) と式 (70) あるいは式 (53) と式 (73) から求められる c_0 と d_0 の和が 1 であることは、幾何学的に容易に証明することが出来る。

* * *

こうして第一中間表色系の測色的色座標 (h, w, s) は、混色比率変換関数を介在して得られた心理的指標 $(v_{0sw}, p_{0cw}, p_{0cs})$ と $(u_{0yr}, q_{0dr}, q_{0dy})$ を用いて、第二中間表色系の心理的色座標 (h_0, w_0, s_0) に変換することが出来る。

5. 混色比率変換関数の決定法

5.1 関数決定の方法

第4章で述べたように、第一中間表色系の測色的色座標 (h, w, s) を第二中間表色系の心理的色座標 (h_0, w_0, s_0) に変換するには、混色比率変換関数を必要とする。この関数は、2色の基本有彩色同士、白または黒と1色の基本有彩色同士、および白黒同士を測色的なある比率で混色した色スペクトルを利用者に提示し、そのスペクトル上の特定のある色について、基本有彩色（あるいは基本無彩色）を基準にした際の色構成比率を推定してもらうことによって決定する。混色比率変換関数は $y = F(x)$ で表され、 x が測色的混色比率、 y が心理的色構成比率である。例えば図6のように x 軸を色スペクトルに対応させ、利用者が x 軸上の混色比率 a のある色を基本有彩色（あるいは基本無彩色）を基準とした構成比率 a_0 で色知覚したとすると、 a_0 が心理的色構成比率となり、関数 F は $a_0 = F(a)$ を満たす。 x 軸の代表点を複数選び、測色的混色比率に対する y 軸の心理的色構成比率を心理実験から測定し、数学的な補間法を用いると、混色比率変換関数を決定することが出来る。

5.2 数学的補間による関数決定

混色比率変換関数 $y = F(x)$ の形状は表色系の色配置の特質から、滑らかに変化するような曲線で、かつ単調性（単調増加、単調減少）を持つことが要求される。このような関数として、次のような多項式で構成される $n-1$ 次関数を用いる。

$$y = c_1 + c_2x + c_3x^2 + \cdots + c_nx^{n-1} \quad (75)$$

測定点を n 点とし、 x, y をそれぞれ測色的混色比率、心理的色構成比率に関するデータとすると、関数の係数は、 n 元連立線形方程式を解くことによって求められる。測定データの性質によっては、稀に変換関数の単調性が得られないこともあるので、注意を要する。関数が非単調性となった場合には、各点を直線で結ぶ線形補間法で対処する。 x を入力信号、 y を教師信号としたニューラルネットワークを用いて、関数 $y = F(x)$ を決定する方法も考えられるが、これには実行時間と精度に難点がある。また、スプライン関数を用いる方法も考えられるが、単調性が満たされないことも多い。なお、式 (75) の入力 x と出力 y の関係を逆にすれば、混色比率逆変換関数 $x = F^{-1}(y)$ を得ることが出来る。

5.3 関数決定の実験方法

混色比率変換関数を決定するための実験方法を具体的に述べる。図13に示すように、コンピュータ・プログラムはディスプレイ画面の左端と右端に、第一中間表色系の6基本色（4色の基本有

彩色と白と黒) 中から2色を混色基準として選んで提示する。そして、左端と右端の間に混色基準の2つの色(第一中間表色系における2色の基本有彩色、白、黒の中の2色)の中間色から成る測色的混色比率の異なる複数の色円を帯状に配置し、被験者にその中の1つの色円を指示する。その中間色とはスケルトン色帯上の色である。(本来なら色円ではなく、色スペクトルを配置すべきであるが、被験者にとっては、複数の色円を帯状に配置する方が実験を行い易い)。1色帯当たり8個程度の色円を配置し、それについての心理的色構成比率を測定する。この場合、被験者が測定する色数は13個のスケルトン色帯に対して104色程度となる。

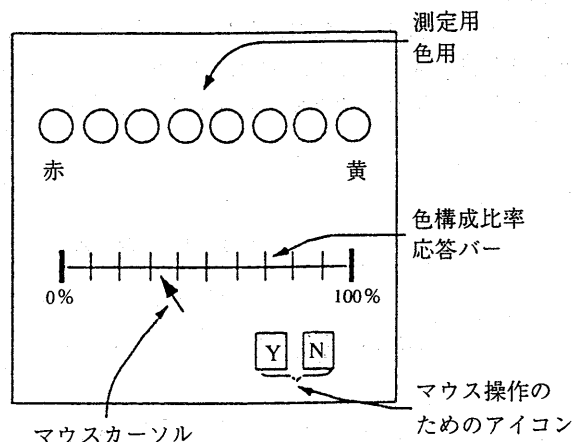


図13 混色比率変換関数決定実験の画面

例えば図13に示すように、被験者がプログラムの指示する赤黄色帯に関して、心の中で感じられるユニーク黄の心理的色構成比率について応答バー上でマウス操作により応答すると、プログラムは、測色的混色比率に対する心理的色構成比率 ($a_0 = F(a)$) を決定する。このような測定を1色帯当たり8個程度の色円で行い、しかも、それを当該色帯について複数回繰り返し行い、その平均を求める。そして測定が終了した後、プログラムはその色帯に関する混色比率変換関数を5.2節で述べた方法によって求め、それを正規化する。

6. 純度変換

6.1 純度変換の原理

6.1.1 高純度色における純度変換

第二中間表色系の作成に際しては、4.1.3項で述べたように白と基本有彩色あるいは黒と基本有彩色に関する混色比率変換関数において、基本有彩色の中にユニーク色がどのくらい含まれているかという比率(関数値)の最大値は一般に1.0未満になることから、その混色比率変換関数には最大値が1.0となるように正規化を施してある。従ってこの操作により、基本有彩色に含まれる白味と黒味の量はすべて色味(ユニーク色)の量と見なされてしまうので、それに応じて第二中間表色系における色味の心理的色構成比率は第二中間表色系の全体において、本来的な比率よりも

大きな値となっている。第4章で求めた心理的色座標 (h_0, w_0, s_0) に対して、基本有彩色において知覚された白味と黒味をもって補正する必要がある。すなわち正規化された混色比率変換関数の脱正規化を行うのである。白と黒がCIE色度図における純度に関係するので、この補正を純度変換と呼ぶことにする。第二中間表色系にこの純度変換を施すことにより、目的表色系ACSが構成される。以下にその方法を述べる。

基本有彩色における純度に関する上記の補正は、第二中間表色系におけるすべての高純度色に関係することでもある。そこで、この補正を高純度色すべてに適用することにする。まず純度変換関数と呼ぶ関数を導入する。これは心理的色相 h_0 において高純度色における白味と黒味の心理的色構成比率を示す関数であり、 $G_w(h_0)$ と $G_s(h_0)$ の2つがある。 G_w が白味、 G_s が黒味に関する関数であり、前者を白純度変換関数、後者を黒純度変換関数と呼ぶ。この2つの関数は利用者の心理実験から決定される。参考のために図14に純度変換関数の様子を示す。

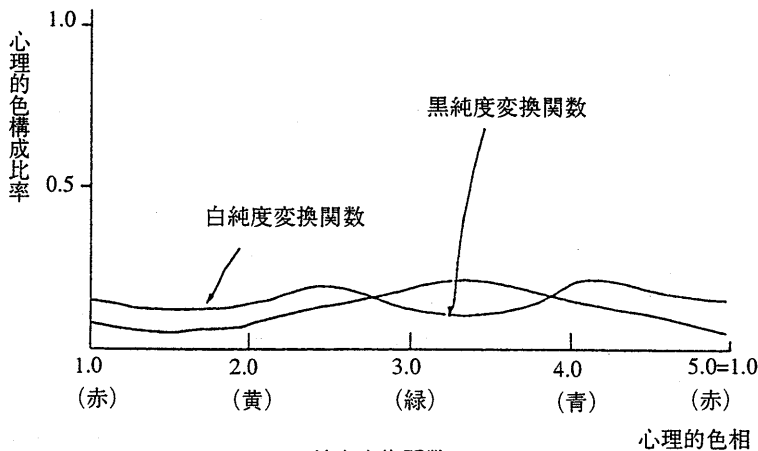


図14 純度変換関数

心理的色相 h_0 における高純度色の本来の心理的色構成比率 ($w_{1-p}, s_{1-p}, c_{1-p}$) は、2つの純度変換関数を用いて

$$w_{1-p} = G_w(h_0) \quad (76)$$

$$s_{1-p} = G_s(h_0) \quad (77)$$

$$c_{1-p} = 1 - G_w(h_0) - G_s(h_0) \quad (78)$$

と補正される。図15に示すように、実線が利用者が知覚した本来の混色比率変換関数であり、点線が正規化された混色比率変換関数である。

(1) 心理的色相の補正

まず、心理的色相に対する補正から説明する。例として赤黄領域に関する色相を取り上げる。赤と黄の基本有彩色に関する本来の心理的色構成比率は、式 (78) を用いた補正の結果

$$r_{1-p} = 1 - G_w(1.0) - G_s(1.0) \quad (79)$$

$$y_{1-p} = 1 - G_w(2.0) - G_s(2.0) \quad (80)$$

として得られる。第4章で求めた赤の基本有彩色の色相における色味の比率 r_0 とその色相のもとで本来の色味の比率 r_1 の間では、図15から明かなように

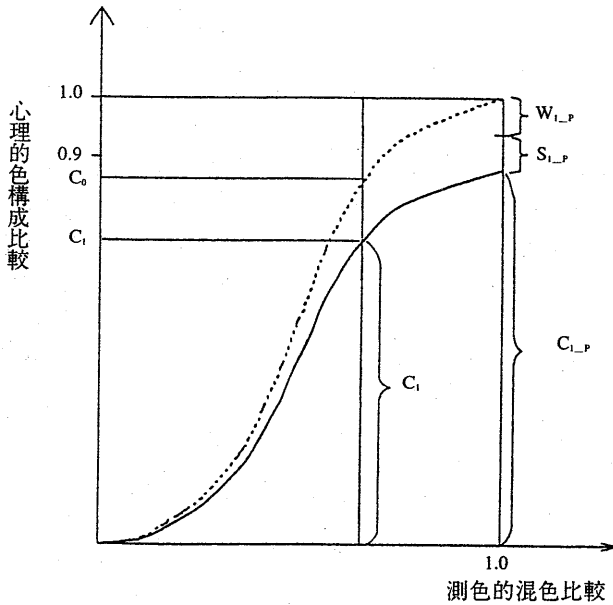


図15 脱正規化の方法

$$r_1 : r_0 = r_{l-p} : 1 \quad (81)$$

の比例式が成立し、また、黄の基本有彩色の色相における y_0 と y_1 についても

$$y_1 : y_0 = y_{l-p} : 1 \quad (82)$$

が成立する。式 (81)、式 (82) を r_1 、 y_1 について解くと

$$r_1 = r_{l-p} * r_0 \quad (83)$$

$$y_1 = y_{l-p} * y_0 \quad (84)$$

である。また、心理的色相 h_0 は式 (6)、式 (7) から

$$n = \text{int}(h_0) \quad (85)$$

$$u_{0yr} = \text{dec}(h_0) = y_0 / (r_0 + y_0) \quad (86)$$

であるので、 y_0 は式 (86) から

$$y_0 = r_0 * u_{0yr} / (1 - u_{0yr}) \quad (87)$$

である。

ところで、本来の心理的色相 h_1 は

$$h_1 = n + y_1 / (r_1 + y_1) \quad (88)$$

で表されるので、式 (88) に式 (83)、式 (84)、式 (87) を代入する。本来の心理的色相 h_1 は、補正の結果

$$h_1 = n + u_{0yr} * y_{l-p} / \{(1 - u_{0yr}) r_{l-p} + u_{0yr} * y_{l-p}\} \quad (89)$$

として得られる。

(2) 心理的色構成比率の補正

心理的色構成比率に対する補正は、前述の心理的色相の補正の場合と同様に考えればよい。第4章で求めた心理的色構成比率 (w_0 , s_0 , c_0) における色味の比率 c_0 と知覚される本来の色味の比率 c_1 の間では、図15から明らかなように

$$c_1 : c_0 = c_{1_p} : 1 \quad (90)$$

の比例式が成立する。従って、この式から高純度色の色味の本来的な色構成比率 c_1 は、補正の結果

$$c_1 = c_0 * c_{1_p} \quad (91)$$

として得られる。また、色味の比率 c_0 の値の中には白味と黒味の比率の合計が $c_0 - c_1$ の値だけ多く加算されて（含まれて）いる。そこで、この値を白味と黒味の w_0 と s_0 に案分すればよいが、それは同じ心理的色相 h_0 での高純度色において知覚された白味と黒味の色構成比率 w_{1_p} と s_{1_p} の比に比例する。すると、一般の色の白味と色味についての本来的な心理的色構成比率 w_1 と s_1 は、補正の結果

$$w_1 = w_0 + (c_0 - c_1) w_{1_p} / (w_{1_p} + s_{1_p}) \quad (92)$$

$$s_1 = s_0 + (c_0 - c_1) s_{1_p} / (w_{1_p} + s_{1_p}) \quad (93)$$

として得られる。なお、式 (92) と式 (93) から、当然のことながら

$$w_1 + s_1 + c_1 = w_0 + s_0 + c_0 = 1 \quad (94)$$

が成り立つ。

* * *

こうして第二中間表色系の心理的色座標 (h_0, w_0, s_0) は、目的表色系ACSの本来的な心理的色座標 (h_1, w_1, s_1) に変換することが出来る。

6.1.2 白と黒の基本色における純度変換

5.3節における心理実験の条件によっては、基本色の白と黒に関する混色比率変換関数 F_{sw} の最大値が1.0よりも小さい値、最小値が0.0よりも大きい値として得られることもある。このようなことが生じるのは、基本色の黒に対しては、ディスプレイ画面に自然光が当たって、本来の黒が多少白味を帯びて知覚されたとき、また、基本色の白に対しては、ディスプレイ装置の強度不足で、本来の白が若干灰色がかって知覚されたときである。このような場合には、混色比率変換関数の値0.5を基準として、黒が100%含まれていると知覚されたときの関数値を1.0となるように、また白が100%含まれていると知覚されたときの関数値を0.0となるように、それぞれあらかじめ正規化を行って、第二中間表色系を作成しておく。

このような正規化が第二中間表色系作成の時点に行われている場合には、6.1.1項に引き続き、それと同様な変換を行う必要があり、これを特に白黒純度変換と呼ぶことにする。正規化される前の混色比率変換関数の最大値を k_w 、最小値を k_s とする。この値は5.3節で述べた心理実験から得られる。また、6.1.1項で純度変換を施して得られた本来的な心理的色構成比率が (w_1, s_1, c_1) である色において、黒味と白味の比率が同じ場合、その色の白味（または黒味）の比率を t_{ws} とすると、それは

$$t_{ws} = (1 - c_1) / 2 \quad (95)$$

で表される。 $w_1 \geq s_1$ のとき、補正された最終的な白味の心理的色構成比率を w_2 とすると、 w_1 と w_2 に関して比例式

$$k_w - w_2 : 1 - w_1 = w_2 - t_{ws} : w_1 - t_{ws} \quad (96)$$

が成立する。これを w_2 について解くと

$$w_2 = \{(k_w - t_{ws}) w_1 + (1 - k_w) t_{ws}\} / (1 - t_{ws}) \quad (97)$$

$$s_2 = 1 - w_2 - c_1 \quad (98)$$

$$c_2 = c_1 \quad (99)$$

が得られる。また、 $s_1 \geq w_1$ のとき、補正された最終的な黒味の心理的色構成比率を s_2 とすると、 s_1

と s_2 に関して比例式

$$k_s - s_2 : 1 - s_1 = s_2 - t_{ws} : s_1 - t_{ws} \quad (100)$$

が成立する。これを s_2 について解くと

$$s_2 = \{(k_s - t_{ws})s_1 + (1 - k_s)t_{ws}\} / (1 - t_{ws}) \quad (101)$$

$$w_2 = 1 - s_2 - c_1 \quad (102)$$

$$c_2 = c_1 \quad (103)$$

が得られる。

なお、最終的な色相を h_2 とすると、その値は

$$h_2 = h_1 \quad (104)$$

であり、白黒純度変換においては色相は不変である。このように、黒と白の基本色に関する混色比率変換関数を正規化した場合には、前項で述べた純度変換の後に継続して白黒純度変換を行う。6.1.1項で述べた本来の心理的色座標 (h_1, w_1, s_1) は、白黒純度変換によって目的表色系ACSの最終的な心理的色構成比率 (h_2, w_2, s_2) に変換される。

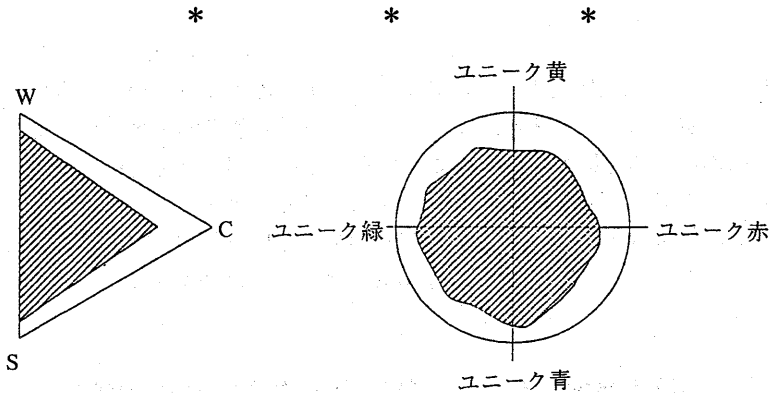


図16 ACSの色表現範囲

本節で述べた2つの純度変換が行われると、図16に示すように、ディスプレイ装置が再現する色は、利用者が知覚することが出来る色範囲よりも狭い色となる。この範囲は、心理実験によって定まるユニーク色相、混色比率変換関数、純度変換関数の影響を受けるので、ディスプレイ装置に基づく顕色系ACSの色表現範囲は、個々人の色知覚に依存するのである。

6.2 純度変換関数を決定する実験方法

純度変換関数を決定する方法を具体的に示す。図17に示すように、コンピュータ・プログラムはディスプレイ画面の左端と右端に、第二中間表色系の4色の基本有彩色の中から2色を選んでそれを提示する。測定するスケルトン色帯は赤－黄、黄－緑、緑－青、青－赤の4色帯である。そして、左端と右端の間に2色の中間色、すなわち色相環の最外周に位置する高純度色から成る心理的色構成比率の異なる複数の色円を帯状に配置し、被験者にその中の1つの色円を指示する。1色帯当たり8個程度の色円を配置し、それについての白味と黒味を測定する。この場合、測定対象のスケルトン色帯が4色帯であるので、被験者が測定する色数は32色程度となる。

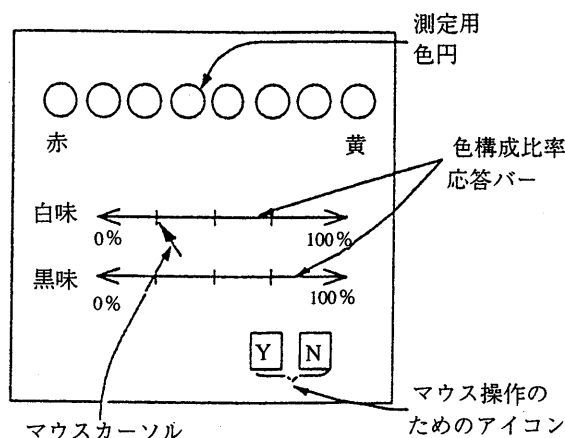


図17 純度変換関数決定実験の画面

例えば図17に示すように、被験者はプログラムの指示する赤黄色帯の高純度色に関して、その色に含まれていると感じられる白味と黒味の本来的な心理的色構成比率について、該当する応答バー上でマウス操作により応答する。このような測定を1色帯あたり8色円程度行い、しかも、それを当該色帯について複数回繰り返して行い、その平均を求める。そして、測定が終了した後、プログラムは、その色スペクトルに関する白純度変換関数と黒純度変換関数を、5.2節で述べたのと同様な方法によって求める。なお、純度変換関数については単調性は要求されない。

7. 電子色見本を表示するプログラム作成のための逆変換

第3章から第6章までに述べたように、ユニーク色相変換、混色比率変換、および純度変換の3つの変換を通して、原始表色系は目的表色系であるACSに変換されるのである。これまでは図3に示す手順に従って、これらの変換を説明してきた。ACSの応用である電子色見本をディスプレイ画面に表示するためのプログラムを作成するには、そのプログラムの中に上記の変換を全て含んでいる必要がある。しかし、そのプログラムを記述する実際の変換の手順は、図3とは逆の手順、すなわち図18に示す手順なのである。というのは、電子色見本を表示するプログラムの論理は、色情報が目的表色系から原始表色系を経てディスプレイ装置へ伝達されるようになっていなければならないからである。本論文では変換理論の展開を説明するための容易さから、図3に示す手順で説明したが、図3と図18とは、それぞれ正／逆の変換関係にある。図3の手順を正変換とすると、これに対する逆変換は、これまでに述べて手順の内容を忠実に逆に辿れば得ることが出来る。上記の3つの正変換における逆変換の概略を、それを行う順序に従って示す。

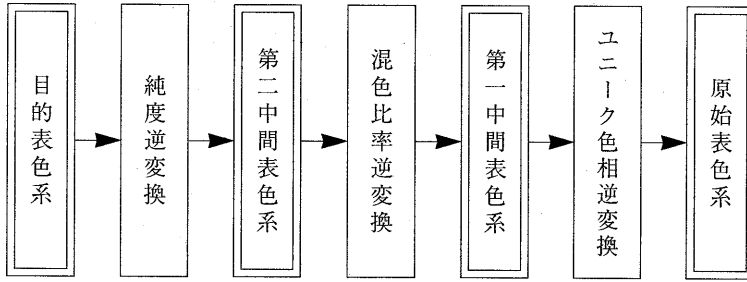


図18 電子色見本等のプログラムの作成手順

7.1 純度逆変換

最初に白黒純度逆変換、次に心理的色構成比率に関する純度逆変換、最後に心理的色相に関する純度逆変換の順番で行う。以下に、目的表色系ACSにおける最終的に知覚される色相を h_2 、最終的に知覚される心理的色構成比率を (w_2, s_2, c_2) とし、それが、第二中間表色系における心理的色相 h_0 、心理的色構成比率 (w_0, s_0, c_0) に逆変換される過程を示す。

(a) 6.1.2項における白と黒の基本色に関して、式 (97) の逆補正を含んだ逆変換の式は

$$t_{sw} = (1 - c_2) / 2 \quad (105)$$

を用いて

$$w_1 = \{(1 - t_{ws}) w_2 + (1 - k_w) t_{ws}\} / (k_w - t_{ws}) \quad (106)$$

$$s_1 = 1 - w_1 - c_2 \quad (107)$$

$$c_1 = c_2 \quad (108)$$

となる。また、式 (101) の逆補正の式を含んだ逆変換は

$$s_1 = \{(1 - t_{ws}) s_2 + (1 - k_s) t_{ws}\} / (k_s - t_{ws}) \quad (109)$$

$$w_1 = 1 - s_1 - c_2 \quad (110)$$

$$c_1 = c_2 \quad (111)$$

となる。この逆変換においては、色相は変化しないので

$$h_1 = h_2 \quad (112)$$

である。

(b) 6.1.1項の (2) の心理的色構成比率については、式 (92)、式 (93) において、心理的色構成比率 (w_0, s_0, c_0) と本来的な心理的色構成比率 (w_1, s_1, c_1) を交換した次の式

$$c_0 = c_1 / c_{1_p} \quad (113)$$

$$w_0 = w_1 + (c_1 - c_0) w_{1_p} / (w_{1_p} + s_{1_p}) \quad (114)$$

$$s_0 = s_1 + (c_1 - c_0) s_{1_p} / (w_{1_p} + s_{1_p}) \quad (115)$$

が逆変換の式となる。ただし、心理的色相 h_1 において高純度色における白味と黒味の本来的な心理的色構成比率 $(w_{1_p}, s_{1_p}, c_{1_p})$ は、2つの純度変換関数 G_{2w} と G_{2s} を用いて

$$w_{1_p} = G_{2w}(h_1) \quad (116)$$

$$s_{1_p} = G_{2s}(h_1) \quad (117)$$

$$c_{1_p} = 1 - G_{2w}(h_1) - G_{2s}(h_1) \quad (118)$$

から得る。関数 $G_{2w}(h_1)$ と $G_{2s}(h_1)$ は、本来的な心理的色相 h_1 に従って (h_1 を独立変数として) 測定された高純度色における白純度変換関数と黒純度変換関数であり、純度逆変換については、この関数 G_{2w} と G_{2s} を用いる。

(c) 6.1.1項の(1)の心理的色相について、例えば赤黄領域に関する式(89)に対しては、次の逆変換の式

$$h_0 = n + u_{lyr} * r_{l_p} / \{(1 - u_{lyr}) y_{l_p} + u_{lyr} * r_{l_p}\} \quad (119)$$

を用いる。ただし

$$u_{lyr} = \text{dec}(h_l) \quad (120)$$

である。なお、高純度色の赤と黄の基本有彩色に含まれる色味の本来の心理的色構成比率 r_{l_p} は、 y_{l_p} は式(79)、式(80)から得られる比率である。

* * *

上記の(a)の白黒純度逆変換過程において求められた本来の心理的色構成比率(w_l, s_l, c_l)の要素、および(b)の純度逆変換過程において求められた心理的色構成比率(w_0, s_0, c_0)の要素の中で、いずれかの要素が負となるかあるいは1.0を越える場合には、その比率の色はディスプレイ装置が再現出来ない色であるので、その色は目的表色系から除外する。

7.2 混色比率逆変換

第二中間表色系から第一中間表色系への逆変換においては、第4章で求めた式(33)、式(34)、式(74)の組、または式(51)、式(52)、式(74)の組が非線形連立方程式であるために、その数学的な逆変換の式を解析的に求めるのは困難である。しかし、第一中間表色系から第二中間表色系を作成する手順の逆は、表色系作成のための方法論的な意味での逆変換(ただし数学的な逆変換ではない)と見なすことが出来る。そこで、第4章における式の導出において、第一中間表色系の測色の色相 h および測色の混色比率(w, s, c)と、第二中間表色系の心理的色相 h_0 および心理的色構成比率(w_0, s_0, c_0)とを交換したものが、 h, w, s, c に関する逆変換の式(独立変数は h_0, w_0, s_0, c_0 である)となる。ただし、混色比率逆変換関数を必要とする。

7.3 ユニーク色相逆変換

h_0 から h への逆変換は、次の手順で行う。 h_0 は7.3節で求めた h を用いる。まず、3.1節に示す式(4)から h_x を h_0 の関数として求める。そして、3.1節における(a)と(b)のように h_0 の範囲によって、添字 i と j および定数 n を決定する。求めた関数に添字 i と j が定める d ユニーク色の色相(a_1, a_2, a_3, a_4)および定数 n を代入して、関数の値 h_x を求める。そして、 $h_x > 5.0$ ならば $h = h_x - 4.0$ 、 $h_x < 1.0$ ならば $h = h_x + 4.0$ 、 $1.0 \leq h_x < 5.0$ ならば $h = h_x$ 、として h の値を求める。

* * *

電子色見本を表示するプログラムは、図18に示す逆変換の手順に基づいてプログラミングされる。なお、このプログラムに必要な機能を参考までに示しておく。①ACSの色立体の任意の断面(色相環や色三角形)を表示する機能、②利用者の最終的に知覚する心理的色座標(h_2, w_2, s_2)によって、特定の色を色立体から検索して表示する機能、③検索された色を原始表色系の色を基準にして比較して表示する機能、④検索された色に対応するCIE-xyY値を計算によって求め、それを表示する機能などが必要である。③の機能によって利用者同士の色の感じ方の違いを知ることが出来る。また、④の機能によって利用者固有のACSを普遍的なCIE表色系に対応させることが出来、作成された電子色見本の客観性を保つことが出来る。

8. おわりに

本論文で述べた変換の原理は、原始表色系の表面および内部の一部分の色配列を観察して、そこから表色系全体の色を再配置するという方法を採用している。すなわち原始表色系の表面に存在する12色帯および内部に存在する1色帯の計13個のスケルトン色帯に関する利用者の色知覚に従って、表色系全体の色の再配置を行おうとするものである。この再配置に用いるユニーク色相変換と純度変換は数学的には線形変換である。混色比率変換についても、利用者がスケルトン色帯について非線形的に色知覚（これは混色比率変換関数で表される）する非線形変換ではあるが、その効果は内部に線形的に影響を及ぼすものとしている。実用的な顕色系ACSを構成するには、第一近似としては、本論文で述べた変換方法で十分であると思われる。

しかし、利用者が内部の色配列を非線形的に色知覚し、その程度が無視し得ない場合には、さらに近似を高める必要がある。例えば、Bezold-Brucke効果（輝度が強くなると色相が異なって見える現象）^(13, 14) や Abney効果（純度が高くなると色相がやや変化する現象）⁽¹⁴⁾ などが知覚されるときである。このような場合でも、ここで述べた変換方法を拡張すれば、より精密な数値モデルを構築することが可能である。本論文では、ページ数の関係で第一近似の変換方法のみしか述べられなかったが、次回以降の論文では、高近似の変換方法を紹介し、ACSを構成する実験例とACSの有効性を総合的に論じてみたいと思う。

参考文献

- (1) 画像電子学会編：カラーマネジメントの基礎と実際—好ましい色再現を目指して—、電子画像学会、pp.5.1-5.8 (1994)。
- (2) 東洋インキ製造(株)編：Cromo Baseユーザーマニュアル(Ver.1.0)、東洋インキ製造(株) (1993)。
- (3) 山口雅浩、岩間涼他：正確な色再現性を有する遠隔表示システムの開発(1)(2)、第57回応用物理学会学術講演会講演予稿集、pp.799 (1996)。
- (4) 富永昌治：ニューラルネットワークを用いたマンセル-CIE変換法、日本色彩学会誌、17巻3号、197-198 (1993)。
- (5) 久下靖征、葛西清重、林正剛：XYZ表色系からNCS表記への座標変換プログラム、日本色彩学会誌、17巻3号、203-208 (1993)。
- (6) 内川恵二：色の見えのモード、恒常性、カテゴリー、記憶—脳の高次レベルにおける色覚の心理物理学—、科学、65巻7号、429-437 (1995)。
- (7) Gary W. Meyer & Donald Greenberg : Perceptual Color Spaces for Computer Graphics, Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 80), Vol.14, pp.254-261 (1980)。
- (8) 池田光男、芦澤昌子：どうして色は見えるのか—色彩の科学と色覚—、平凡社 (1992)。
- (9) 日本色彩学会ISO TC/187色表示国内委員会訳：NCS (Natural Color System) に関するスウェーデン規格—Swedish Standard SS019100E邦訳の試み—、日本色彩学会誌、17巻3号、pp.209-217 (1993)。
- (10) Anders Hårdt & Lars Sivik : NCS - Natural Color System : A Swedish Standard for Color Notation, Color Research and Application, Vol.6, No.3, pp.129-138 (1981)。

- (11) NCS Color Atlas96 (SIS SS019102,2nd Ed.), Scandinavian Colour Institute AB, Stockholm, Sweden (1996).
- (12) 広内哲夫、坂本和義：反対色応答を示す段階説の数理モデルとその応用、情報研究、第18号、pp.159-178 文教大学情報学部(1997)。
- (13) D.McL. Purdy : Special Hue as a Function of Intensity, The American Journal of Psychology, Vol.43, pp.541-559 (1931).
- (14) G.Wyszecki & W.S.Stiles : Color Science - Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae - (2nd Edition), John Wiley (1982).

広内哲夫 (文教大学情報学部)

坂本和義 (電気通信大学電気通信学部)