

資料

色票系の原理

A. R. Robertson

National Research Council Canada

はじめに

色票系（カラーオーダーシステム）とは、三次元空間の中に色を論理的に分類、配列する方法である。一般的にはその空間の中から規則的な間隔で選んだ実試料の集合（色票集）、として表現される。そのような系または集合を用いれば、色に関する情報の交換や色彩美学、色彩調和の表現などが便利に行われる。ここでは色票系の原理を整理し、そして主な色票系の概要、またその各々の比較について示す。

色について厳密に話をするには、“色”という言葉がもつ少なくとも5つの意味を正しく理解しなければならない。まず第1の“色”は、眼に可視波長域の電磁放射が入射して、網膜の感光細胞（すい状体）に吸収されることによって生ずる視知（感）覚を表現するために用いられる。第2の“色”は、電磁放射そのもの、すなわち感覚を生じさせる対象の刺激を表現するために用いられる。第3の“色”は、色知覚を生じさせる電磁放射を発する発光物体を表現するために用いられる。第4の“色”は、色知覚を生じさせる電磁放射、あるいは透過する表面、または物体を表現するために用いられる。第5の“色”は、単独、あるいは混合された顔料、染料が物体を着色させる場合に、その顔料や染料そのものを表現するために用いられる。以下、色に関してその内容が不明確となる場合には、意味をより正確に表現するために次の5つの言葉を用いる。

1. 知覚色 (Perceived color)
2. 色刺激 (Color stimulus)
3. 光源色 (Colored light)
4. 物体色 (Object color)
5. 色材 (Colorant)

色空間、表色系、色票集

色空間とは、色を幾何学的に表現するための三次元空間である。ここでいう色には、知覚色、色刺激、光源色、そして物体色が対象となるであろう。

空間における色の位置は、特定の3変量から導かれる3つの数値で定められる。知覚色では、知覚色を表わすことができる3つの属性、例えば色相、明度、彩度に対応した変量が用いられる。色刺激では、三刺激値、あるいは三刺激値から導かれる3変量が用いられる。光源

色、物体色では、対象となる光や物体の物理的組成（例えば3種類の色材の混合量）に関係する3変量が用いられる。適切に選ばれた3変量（特定の記号をもつ）によって色を明確に表示する一連の規定、および定義を表色系という。色空間によっては一組以上の変量を用いる場合もあるが、3つの変量が互いに独立であること、即ち2変量が変化しても残る1つの変量は一定である、ということが最低限必要である。

表色系は各々記号をもつ実試料（色票）を集めた一組で表わされ、表色系に従って配列した実試料の集合を色票集 (color atlas) とよぶ。

ここでは主に反射物体色を整理する系、そして反射物体によって生ずる知覚色を分類する系について述べる。当然のことながら両者は密接に関係している。なぜなら、特定の観察条件のもとでは、物体色と知覚色とは一対一に対応しているからである。知覚色を表現する記号は、観察条件を定めれば物体色にも適用することができ、そのような場合には物体色を表現する色票集が知覚色の系にも適用できる。

色空間の基本構造

種々の知覚空間には共通した特徴があり、その第1のものは“無彩色 (achromatic)”軸である。色相をもたない知覚色がその無彩色軸に沿って配列される。反射物体では「白、灰、黒」という表現がそれに対応し、透過物体では「透明、無色、中性」が対応する。物体色、あるいは知覚色を表わす系の無彩色軸は、白色を頂点、黒色を底点とする鉛直軸で表わされる。無彩色軸に沿って変化する属性に対応する表現は“明度 (lightness)”である。

透過物体では反射物体の場合と若干異なり、無彩色の頂点には完全に透明な物体の色が対応する。発光物体における無彩色の頂点は視覚系に生ずる最大の明るさ感覚であり、底点は全く光のない状態を表わす。以下、反射物体だけを対象に述べるが、多くの内容は透過物体や発光物体についても適用できる。

図1に示されるようにほとんどの色票系で、有彩色は無彩色軸の周囲に存在し、色相は赤、橙、黄、緑、青、紫、そして赤にもどるという順番に従っている。この色相環は系によって、時計回りのものと、反時計回りのもの

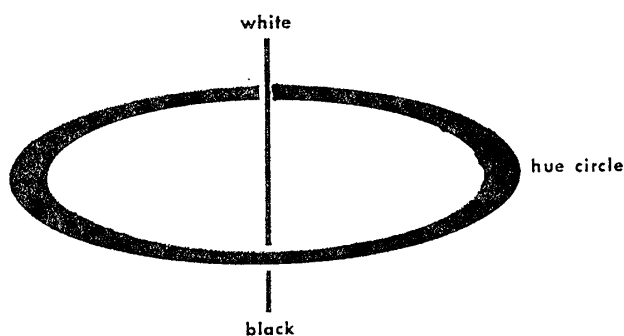


図1 色空間の基本構造

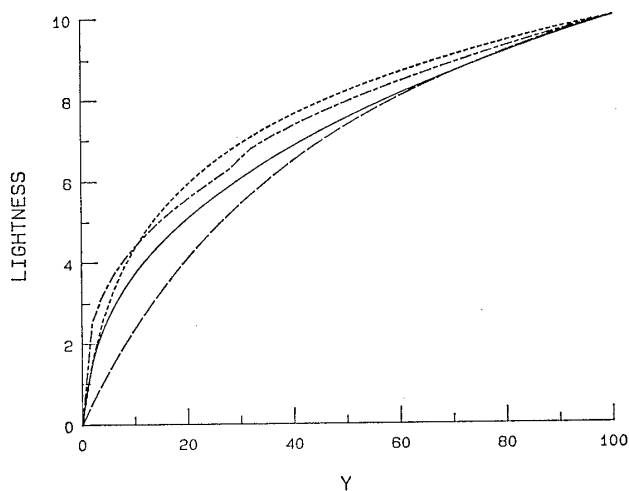


図2 各色票系におけるルミナンスファクタ (Y) と無彩色スケール (Lightness) の関係

のがある。

無彩色軸

ほとんどの系が無彩色軸をもつが、系ごとに無彩色軸に対する色の配列方法は大きく異なっている。図2にマンセル系(——), OSA系(-----), DIN系(.....), NCS系(----)の各色空間の無彩色軸上の点(これまで明度としたもの)に対応するルミナンスファクタ(輝度率)を示すが、無彩色軸の中心(明度=5)では $Y=12\sim27$ の範囲にばらついている。

NCS系の無彩色スケールは表面色の白さ(whiteness)に比列した量を表わすが、マンセル系, OSA系, DIN系の無彩色スケールは知覚される明度差と等歩度になるように尺度化されている。このようにNCS系の無彩色スケールは他の3つの系の無彩色スケールとは異なっている。しかし、驚くことにNCS系を除く他の3つの系の無彩色スケールもまた各々異なっているのである。

OSA系はCIE1964—10度視野測色補助標準観測者によって定義され、他の系はCIE1931—2度視野測色標準観測者によって定義されている。しかし、この違いは無彩色の場合ほとんど影響しない。

マンセル系, OSA系, DIN系の明度スケールが相

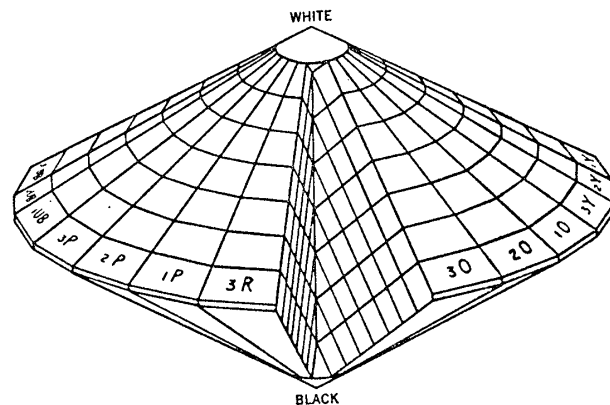


図3 オストワルト系の色立体

互に異なっている原因の1つに、各系の基礎となる無彩色スケール実験における背景の種類の違いがある。例えばよく知られているように、2つの明るい物体色は明るい背景のもとでその差がはっきりと知覚され、逆に2つの黒い物体色は黒い背景のもとでその差がより明瞭に知覚される。明度スケールに対する背景の影響は、マンセルバリューが背景の明度によって変化することから明らかである。OSA系の明度スケールでは、この背景による無彩色スケールの変化が補正されている。

基本色相環

全ての色票系に共通して、色相は同じ順序に従い無彩色軸のまわりを円環状に配列されている。しかし、その配列の仕方は細かいところで異なっている。いくつかの系(例えば、NCS系やオストワルト系)には基本色相環があり、それは特定の色相における可能な限りの最大彩度(chroma)のサンプルからなっている。このような色は完全色(full color)と呼ばれ、無彩色軸の中心とした水平断面上の円環に位置している(図3はオストワルト系の色立体)。

完全色の正確な定義は系ごとにわずかに異なっている。オストワルト系の完全色は最明色(optimal color. 分光分布が波長に関して0か1の色刺激)である。しかし、オストワルト系を実現する色票集(Color Harmony Manualなど)では、色票集の完全色は色材で実現できる最大彩度(chroma)の色という妥協がとられている。一般には、色材で実現できる色の彩度(chroma)は最明色の彩度より低い。NCS系において完全色、あるいは“最も鮮やかな色(maximum chromatic colors)”と呼ばれる色は、黒さも白さも知覚されない完全な有彩色である。NCS系の完全色は知覚色であると定義されているので、色刺激に基いたオストワルト系の完全色とは同じであるとは限らない。オストワルト系の完全色とそれに対応する知覚色とが、一対一の関係をもつように観察条件を定めても、その知覚色はNCS系の完全色とは等しくないであろう。

色相, 明度, 彩度(chroma)

NCS系, オストワルト系以外の色票系, すなわちマ

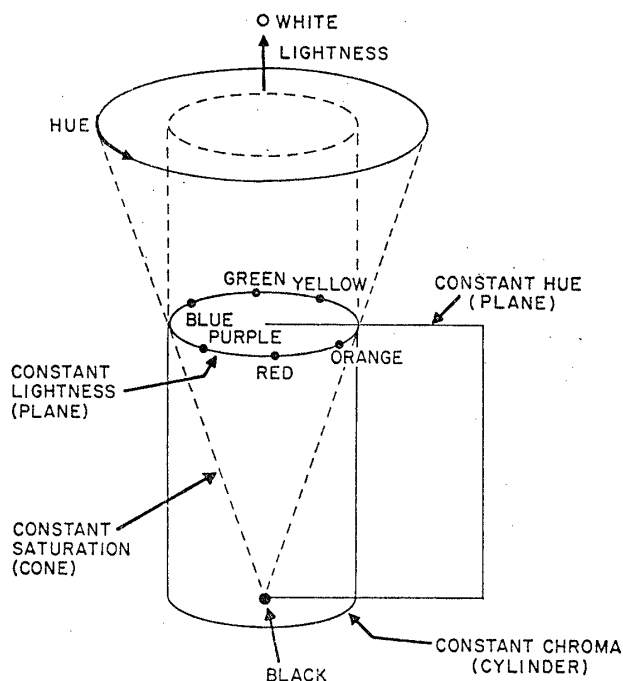


図4 色相・明度・彩度による色空間モデル

ンセル系, OSA系, DIN系には基本色相環という概念はない。その代わりに空間は知覚色を表現できる3つの属性で構成され, 最も一般的に用いられる属性は「色相」, 「明度」, 「彩度」である。

「色相」とは, 任意の知覚色が特定の知覚色, 赤, 橙, 黄, 緑, 青, 紫の1つ, または2つの比に類似して見えることに関する属性である。これは閉じたスケール(紫のつぎは赤にもどるという意味)であるので, 色相を表現する最も適切な幾何学的軌跡は円環である。

しかし, 各色相にはまだ多くの異なった知覚色が存在している。多くの人が明瞭に知覚するつぎの属性は「明度」である。明度はある面に光が入射して反射してくる光が, 多く見えるか, 少なく見えるか, ということに関する属性である。

等色相, 等明度の物体色に対して, 残りの性質を表わす第3の属性は「彩度(chroma)」と呼ばれる。彩度は知覚の色の強さに関する属性であり, 等明度無彩色からの隔たりの度合いを表わす。

図4は知覚色を最もよく表現するための, 色相, 明度, 彩度による三次元幾何学モデルである。無彩色(灰色)知覚は黒から白の範囲に分布し, 図4の鉛直軸(明度軸)上の点に対応している。全ての有彩色知覚はこの無彩色軸からの隔たりの点で表わされる。等明度の知覚色は空間の水平面上の点で表わされ, 等色相の知覚色は中心の無彩色軸から放射状に広がる鉛直平面(断面)上の点で表わされる。色相は等色相面が比較平面に対してなす無彩色軸を中心とした角度で表わされる。等彩度の知覚色は, その彩度の大きさに対応した半径をもつ同心円柱で表わされる。

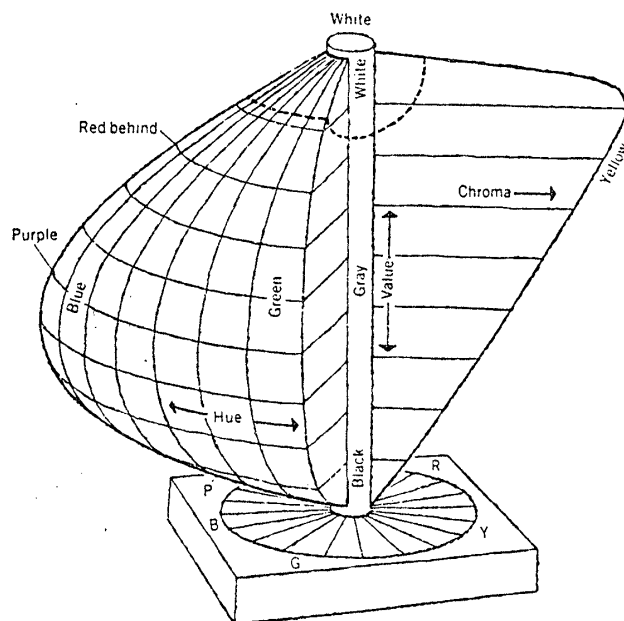


図5 マンセル系の色立体

彩度(chroma)を変形したものにサチュレーション(saturation, 飽和度)がある。サチュレーションは感覚量の総和に占める有彩色の性質に対応する量(色みの強さ)の比率である, 一方, クロマ(chroma)は, 有彩色の性質に対応した量である。(色票系の)幾何学モデルでは, 等サチュレーションの知覚色は黒の点を頂点とした(逆)円錐になる。サチュレーションに関して重要な点は, いわゆる色の“シャドウシリーズ(shadow series)”である。これは物体に光の影が段々に濃くなると, 明度も彩度(chroma)も共に減少するように知覚されるが, サチュレーションは一定不変に知覚されることをいう。

この色相, 明度, 彩度の3属性を変形した属性が用いられることもある。その場合, 知覚色とは対応しない属性もあり, それらは系の実試料をつくる色材, または色性もあり, をつくる色材, または色刺激の物理的, 心理物理的属性に関係したものである。

色相/明度/彩度を用いた系において, 無彩色軸を中心とした水平面上の円環には明度, 彩度が一定である全ての色相の色が含まれている。完全色の明度および彩度は色相ごとに異なっているので, この色相環には完全色の全ては含まれていない。完全色を結んだ軌跡を描くこともできるが, その線, あるいは“色相サーキット(hue circuit)”は円にはならず, かつ水平面上の線にもならない。図5はマンセル系に関して示したもので, 最大彩度サンプルの明度, 彩度は明らかに色相ごとに異なっている。

色相環の分割

色相環に色相を配置する仕方にはいろいろな方法がある。例えばNCS系では互いに全く類似性をもたない, 6つの基本表面色(白, 黒, 赤, 黄, 緑, 青,)が存在

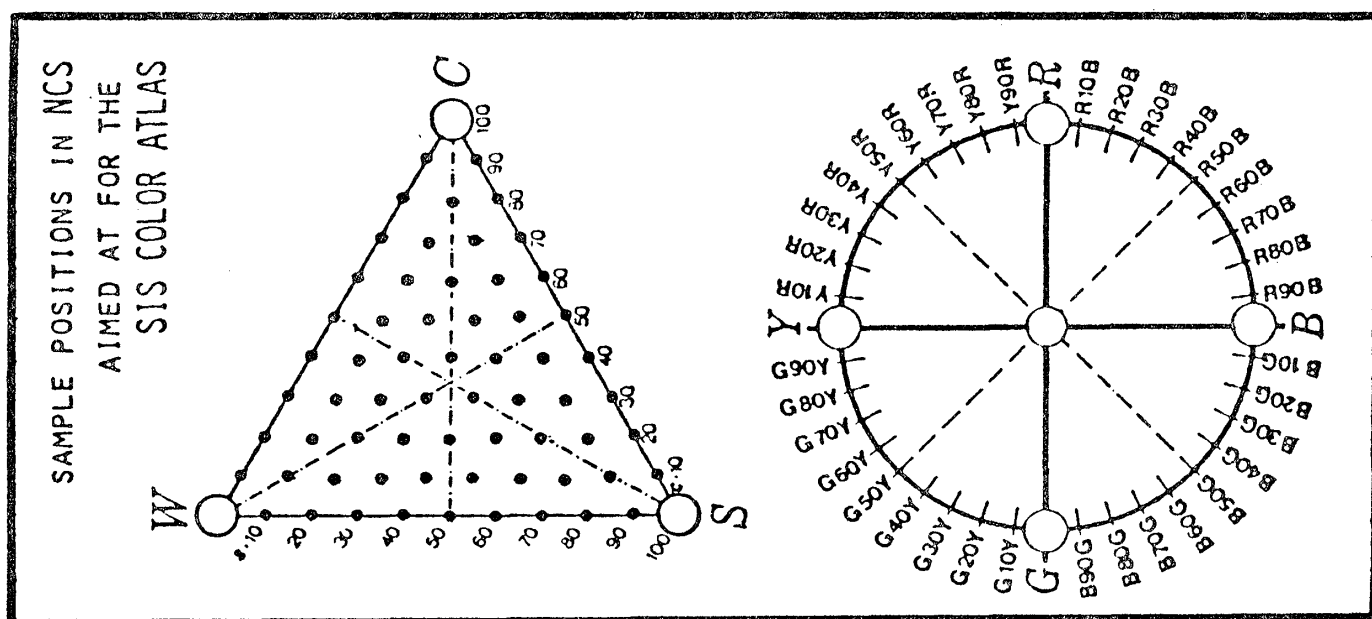


図6 NCS系の基本構造

することを仮定する。このため基本色、赤、黄、緑、青の4色は、完全色の色相環で90° ずつ分離した位置に配置される。この4つの基本色以外の完全色は、近接する2つの基本完全色との類似の程度により、その2つの基本色にはさまれた位置に配置される(図6)。

他の系(例えば、マンセル系)では、色相の等間隔が知覚的にも等間隔になるように、色相環を等歩度に分割する方法をとっている。したがって、この分割方法では基本色相が90° ずつ分離することにはならない。例えばマンセル系の色相ステップは、NCS系の色相ステップと比較して、黄-赤の象限よりも赤-青の象限で分割ステップがより細かくなっている。

第3の分割方法(これはオストワルト系で用いられているが)では、180° に分離した色相の色を回転マクスウェル円盤などで加法混色すると無彩色刺激を生ずる。

他の分割方法(例えばペイントの混合で有効なもの)では180° に分離した色相のサンプルは減法混色して、互いの彩度を減ずる目的に用いられる。

色合いの属性 (nuance attributes 色名による分類)

多くの色票系では等色相の知覚色が、色空間の鉛直平面(色相ごとに一平面)上に配列されている。この平面内で種々の色を配列し記号化するために、色合いの属性(色名による分類)がしばしば用いられる。図7は赤の色相面を色合いの属性によって色名分類した例である。色合いの属性には、明度と彩度(chroma),あるいは明度と飽和度(saturation)の組が用いられる。

これとは全く異なる色合いの属性がNCS系で用いられている。NCS系では知覚色が、基本色・黒、基本色・白、および等色相の最大有彩色、の3つの色のおののに対する類似の程度で表現される。この類似の程度

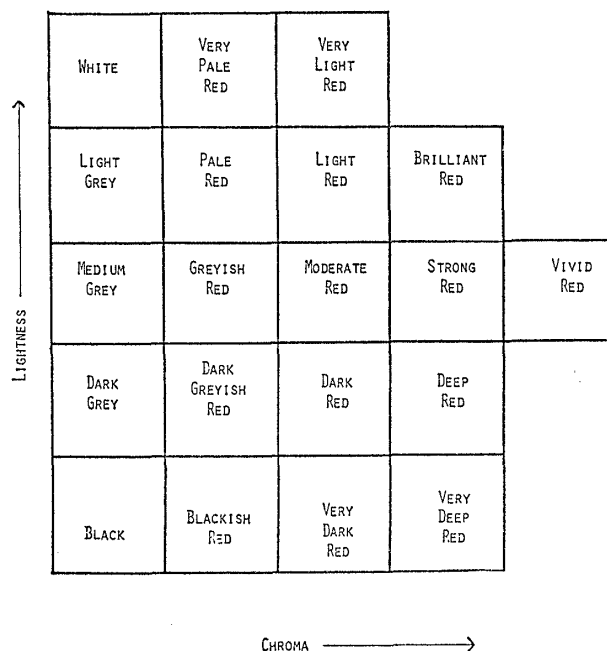


図7 色合い属性 (nuance attributes による分類)

は、「黒さ (blackness)」, 「白さ (whiteness)」, 「クロマチックネス (chromaticness)」とよばれ、その総和は100になるように基準化される。したがって、この3変量の中の2変量だけで、ある色を色相面上に配置することができる。NCS系では一般に、黒さとクロマチックネスの2変量がその目的に用いられる(図8)。オストワルト系の属性も原理的にはNCS系と類似しているが、厳密には属性の定義、空間配列が異なる。最も大きな違いは、オストワルト系が知覚色の類似性ではなく色刺激の加法混色に基づいている、ということである。

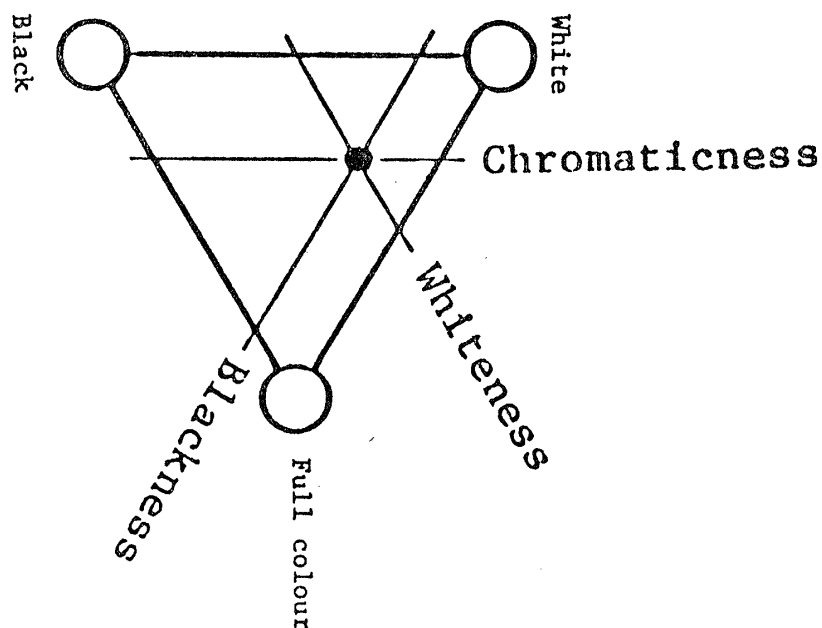


図8 NCS系の黒さ、白さ、クロマチックネスの構成

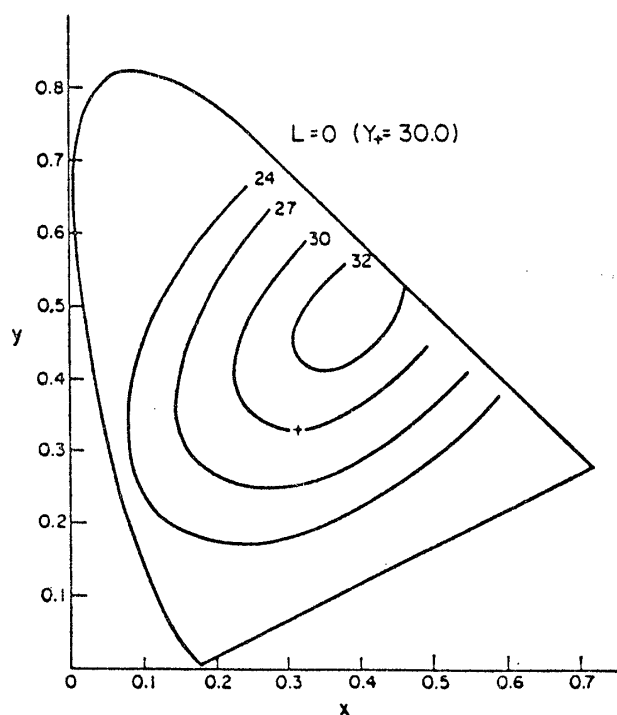


図9 有彩色における明度と明るさの関係
 $Y_+=30$ の白色光 (図中+) と等しい明るさを与える色光のY値軌跡

有彩色の明度

各色票系の明度尺度は、無彩色よりも有彩色での違いの方が大きい。マンセルバリューはルミナンスファクタの関数として定義されるが、図9に示すようにルミナンスファクタ一定のサンプルの明るさ (perceived lightness) は、無彩色軸からの隔たるほど (彩度が大きい)

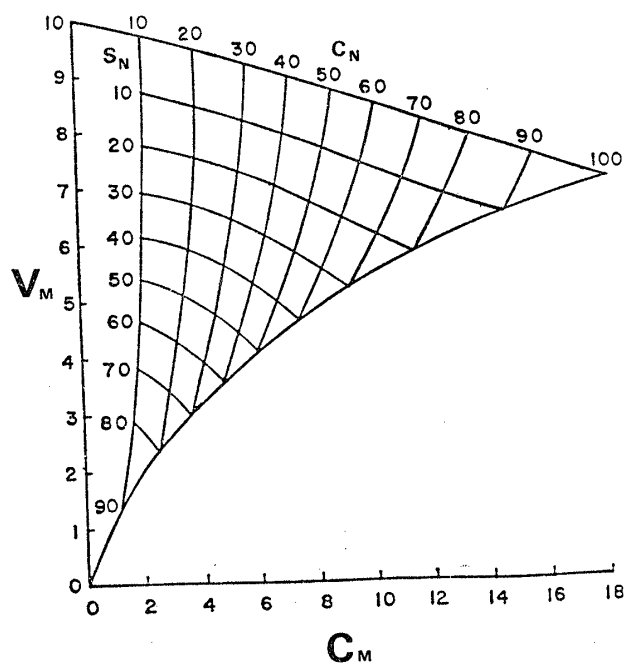


図10 マンセル系とNCS系の関係
 マンセルバリュー (V_M) / クロマ (C_M)
 NCS黒さ (S_N) / クロマチックネス (C_N)

増加する場合がある (訳者注: 一般的にヘルムホルツ・コールラウシュ効果といわれる)。OSA系ではこの変化を考慮に入れて、明度とルミナンスファクタの関係を色度座標の関数で修正した明度尺度を用いている。

DIN系において、明度 (増減が逆であるが) と最も近い属性は暗度 (darkness degree) である。暗度はサンプルの色度と等しい最明色の明度との相対値で尺度化したものである。この定義の結果、例えば一定のルミナ

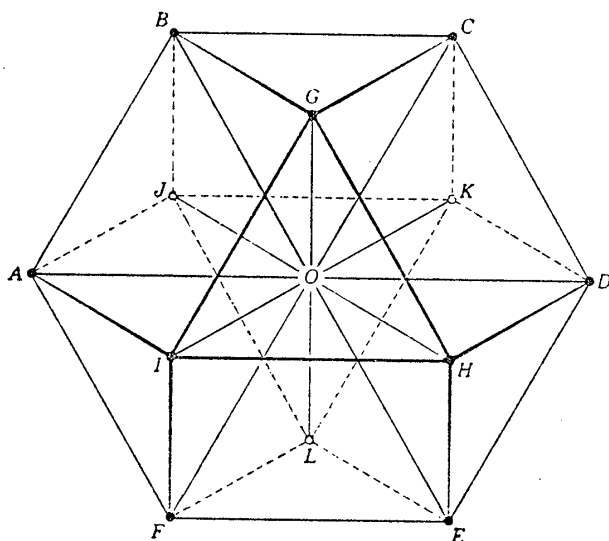


図11 OSA系の基本構造（正斜方六面体格子）

ンスファクタではサチュレーション（飽和度）が増加すると暗度は減少する。しかし、この変化は明るさ（perceived lightness）の変化とは相関していない。

NC S系には明度という属性はない。無彩色に関してルミナンスファクタと白さ（whiteness）の関係が決められているが、その関係は有彩色には適用できない。NC S系の等色相平面上に一定のルミナンスファクタを示す軌跡を描くことはできるが、これは直線ではなく曲線になり、また曲線形状も色相ごとに大きく異なる。図10はマンセル系の明度／彩度平面上にプロットしたNC S系の黒さ一定の軌跡である。

実試料の選択方法

特定の色空間を表現する色票集の実試料（個々の色票サンプルのこと）は、一般的には色空間に描いた規則的な格子の交点に選ばれ、多くの場合等色相面を表わす鉛直平面に格子がとられる。マンセル系がその例であり、等色相面において互いに直交する格子（明度／彩度の軸）を用いる。また三角格子は黒色度／白色度／クロマチックネスを用いる系では便利である。

OSA均等色度図における選択方法は三属性に従った尺度化に基づいていない。選択点は正斜方六面体格子構造に従って配列され、選択点とその近傍12色との距離がどの格子でも知覚的に等しい色差を与えるようになっている（図11）。

しかし、実試料の選択方法と色空間そのものとは区別して扱わなければならない。例えばマンセル色空間を正斜方六面体格子に従ってサンプリングして、各選択点にマンセルヒュー／バリュー／クロマを与えることもできるし、逆にOSA空間をマンセル系のような円柱格子をもつ空間としてサンプリングすることもできるからである。

実用上の理由により、実試料（色票）は常に目標点に正確に一致するとは限らない。従って、色票集とそれが

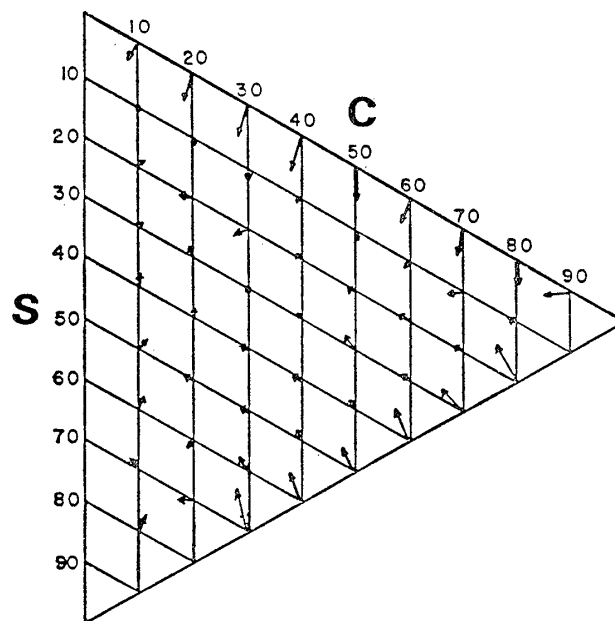


図12 NC S色票集の実試料（矢印の頭）と目標点のずれ

表わす表色系とを区別することが大切である。また色票集に欠陥があるからといって、直ちに表色系の欠陥であるとは限らない。図12はNC S系の色相Y30Rの目標点を表わす三角格子であるが、NC S色票集の実試料の選択点（格子点の矢印）と目標点は一致していない。

色彩恒常（color constancy）

色票集を作製する場合、しばしば見過ごされてしまう重要な問題に色彩恒常がある。この問題を考慮した色票集を作製するためには、色材を吟味し、また光源を変えたときにも物体色と知覚色とができるだけ変化しないようにしなければならない。特に厳密に言うならば、色票集の観察に用いる光源は、常に色票集が作製されたときに用いた標準光源としなければならない。色票集の物体色が、その表色系の知覚色を正しく表現するにはこの方法しかない。もし照明光源が標準光源ではない場合には、色相面における空間配置、または色相恒常のひずみが生じて、色票集の使用者を惑わすことになる。

おわりに

色票系は多種多様な原理に基づき得るものであるが、その全てが互いに両立可能であるものではない。いろいろな目的を満たすためには目的ごとに色票系を必要とするが、そのような複数の色票系が表現する基本的な色空間は全く同じものなのである。すなわち、ある系の中の1点は他の系においても厳密に1点として表わされ、精密に検討すれば系ごとの関係を正確に結びつけることができるはずである。そのような研究には、知覚色と物体色を厳密に区別して、さらに現存する表色系と色票集の違いが観察条件の差による、ということを正しく理解する必要がある。

重要なことは、観察条件が変われば物体色と知覚色の

関係は変化してしまう，ということである。

.....
第165回関東支部例会 1986年11月28日（金）聖心
女子大に於いて
.....

（訳） 澁田隆義 （株）東芝 総合研究所
 矢口博久 千葉大学工学部
.....

ロバートソン博士の講演会が開催された経緯

ロバートソン博士は第1回スガ国察ウェザリングシンポジウム（S I W, 86, 昭和61年11月25日日本都市 センタで開催）の講師の一人として，（財）スガウェザリング技術振興財団から招待され来日した。色彩学会ではロ博士の来日の機会をとらえ，色票系に関する講演を博士にお願いし，同年11月28日聖心女子大学において講演会を開催（第165回関東支部例会）することとなった。