「色」特集

色と吸収スペクトル

飛 田 満 彦

1. 色彩文化と色彩科学

私達の身の回りには天然、人工を問わず数々の色彩がある。澄みわたった青い空、色とりどりに咲き乱れる花の色。しかし誰も空が青い性質をもってしているとは思えない。朝日に夕日に赤く輝くからである。これは光の屈折と反射で空が彩られるためであることは言うまでもない。では花の色・衣服の色などはどうであろうか。人によっては、これは色をもつ物質・色素がある故であると答えるかも知れない。では物質の色とはどう言うことであろうか。そもそも「色」が物質の属性となりうるであろうか。つまり空の色と基本的には差異がないのではなからうか。例えば、白紙が白い性質をもつとは言えぬことは、これに青や赤の光をあてれば直ぐに判る。では物質の個性として色を採用するとすれば、どのような定義を用いるべきであろうか。

自然科学においては、客体は主体から独立であることを前提とする。物質の個性は分光学的に光の選択吸収である。白紙は光を吸収しないものであり、色彩をもつ物質は光の吸収に波長選択性をもつものである。このような分光学的な色の理解は、現在我々にとって余りにも自明の理であるが故に、とかく『光の選択吸収=色』という短絡に甘んじてはいないであろうか。しかし色は吸収スペクトルではないが、吸収スペクトルを用いて色を語ることは、自然科学的手法を用いる限り避けることはできないであろう。以上の理由から、表題についての私見の一端を述べるにあたり、蛇足の感なしとは言えないが、『色』についてその足元から出発したいと考える。

1.1 はじめに祈りの色彩文化があった

人類と色彩とのつき合いは有史以前からである。しかし、現在とは全く異なる祈りの色彩であった。迂遠ながら旧約聖書やわが国の古代の歴史からその概要を纏めてみよう。

Color and Absorption Spectrum

筆者紹介 MITSUHIKO HIDA, TOKYO METROPOLITAN UNIVERSITY, 東京都立大学工学部教授, 工学博士

筆者は色素化学、有機合成化学が専門。著書はファインケミカルズ(丸善, 1982), 有機量子化学入門, 基礎編, 応用編(学会出版センター, 1981)など。趣味は絵画。本稿では、文化的側面からも大きな問題である「色彩」に関し、分光学的理論の立場からその意義と問題点を中心に解説していただいた。

ゆっくりとした歴史の流れの中で、エジプトの地に住みついたイスラエル人レビ家の女が1人の美しい男子を生んだ。数奇な人生を歩んだこの子はモーゼと名付けられた。当時エジプト王はイスラエル人の強いことを恐れ、迫害を続けていた。成長しこのことに怒りを感じたモーゼは神の導きに従い、同胞を引きつれエジプトを逃れ出て、乳と蜂蜜の流れる地をもとめ、シナイの荒野を流浪した。この間、モーゼは行く先々で幕屋を設け、種々の捧げ物をして神に仕えた。神の教えに従ったものである。幕屋の五枚の幕は亜麻の撚糸、青糸、紫糸、緋糸でつくられ、神への捧げ物には金、銀、青銅、青糸、紫糸、緋糸、やぎの毛糸、茜染の雄羊の皮、縞めのう等が用いられた。さらに、モーゼは神の教えに従い、同行した大司祭アロンの祭における聖なる衣服を定めた。後世、5世紀における司祭の衣服も同様であったと言われており¹⁾、それによると、上服に黄・青・白・緑・茶・赤・黒・緋紅の八色が用いられている。

わが国にも古代から染色技術があったが、自然に対する祈りに深く根ざしている²⁾。わが国の色彩文化の特徴は、古代聖徳太子の仏教思想に基づいた国造りに深いつながりがある点にある。仏教思想の浸透とともに、祈りの祭行為に従って色彩が重要視された。推古天皇11年に制定された「六色十二階制」に始まり、一連の天皇家の服色制の改定により民族色彩が固定されて来た。

これらの記録は、色彩文化の面で大きな意味をもっている。染色技術が最も古い技術であることは言うまでもないが、古代における彩色が宗教的・魔術的・儀式的であったことも注目すべきである。色彩が芸術的となり、さらに生活の中の美意識に深く入り込んだのは後世のことである。例えば、わが国においては、貴族が力を失い、祈りにつながった色彩文化が衰退するとともに、実用的・美意識としての色彩文化が生れた。色彩が完全に庶民に解放されたのは応仁の乱(1467年)以降であると言われ

ている²⁾。

このように、色彩が我々の生活の中に取り込まれるまでは、長い歴史の経過があり、人類の文化の中に重要な地位を占めて来たことにあらためて注目すべきである。一方、物の色が何により生ずるかの議論も長い歴史をもっている。

1.2 色と光

色が光により生れると言う発想はわが国の色彩文化からは生れてこなかったが、ギリシャの哲学者アリストテレスはすでに、物が見えるのは光によることを述べている³⁾。ニュートンの光学(1704年)は、現代における分光学的色彩科学の基礎とされているが、これに対するドン・キホーテ的な反発からゲーテが『色彩論』(1808年)を発表した。ゲーテの『色彩論』は科学論文というよりは、むしろ文学的作品と位置づけられる⁴⁾。ニュートンに対する激しい批判は、数学・物理学に対する知識が不十分であった故に、価値が低いものとされているが、その序論に相当する第一部教示編は、分光学に偏した色彩論に対する批判を越えて、総合的な広い視野から鋭い直感による優れた内容をもつものとして評価されている。

ゲーテは色彩を三種に分けたが、第一の『生理学的色彩』が意味をもつ。『眼に属し、眼の作用と反作用に基づいている限りについて考察した』場合が、生理学的色彩である。これを彼がまず第一においた理由として、『それらが主観に、すなわち眼にまったく、あるいは大部分属し、色彩論全体の基盤をなしている』からである。このように、彼の色彩論の出発点は、色は主観にあることである。

ここで、ゲーテの色彩論から三様の世界像について言及しておきたい。まず、ニュートン力学の世界像とも言うべきもので、客体と主体とを隔然と分け、客観に主観が入り込む余地はない。第2は量子力学の世界像とも言うべきもので、観察により客体が乱されうる世界である。そして第3は主観と客観の関係において成立する世界であり、ゲーテが色彩論において取った立場である。

本来彼の自然観の中心は⁵⁾、『いかなる分析・解析も総合を前提とすべきである』ことであった。自然科学が組立て不可能なまでに自然を分解してしまうことに、彼は同意していないと見ることができる。光を分解した結果を総合した所に色彩論の課題があると言う点は、極めて重要な視点である。

では、自然科学の立場から、『色は主観であり、総合の立場』から展開可能であろうか。どのような手順に従えば、このような立場から出発して分光学的色彩論に至ることが可能なのであろうか。

2. 色感覚と光吸収

色感覚(あるいは色知覚)は、外界からの刺激によって誘発された大脳における高次の心理物理現象である。では、外界からの物理学的刺激が、どのような生理学的過程を経て大脳での高次心理物理量に変換されるのであろうか。その過程は模式的に図1に示したようにⅠ～Ⅲに大きく分けることができる。Ⅰは光源・物体における光の反射、屈折、吸収の過程で、客体の性質に依存する純粋な物理量の過程である。もう少し細かく見れば、光源のもつ物理量が、物体との相互作用により反射光あるいは透過光の物理量に変換される過程である。Ⅱの過程においては、入射光の刺激を受けて網膜にある光受容細胞が神経電流(色刺激)を発生する過程である。ここでは入射光の有する物理量が色刺激という心理物理量に変換される。Ⅲでは大脳が色刺激をうけると、これらを総合するとともに、記憶も呼び出され入力情報と総合・組み立てがなされ、高次の心理物理量である色感覚・色知覚が発生する。我々が色彩という時にはまぎれもなくⅢの過程で発生した色感覚・色知覚である。しかし大脳における諸過程は依然としてブラックボックスであり、我々の手の内に入っていない。従って、網膜において発生する色刺激を心理物理量として定式化して、これを色として扱うことが一般に行われている。このようにⅢの過程の前段階で止めたことは、色知覚における重要な多くの現象を議論の対象からははずしたことになる。

Ⅱの過程で発生する心理物理量、すなわち色刺激は眼に入射した光の組成に当然依存する。従ってこのレベルでの色彩論を分光学的色彩論と言ってよいであろう。入射光の分光学的組成は、Ⅰにおける光と物質との相互作用によるものであるが、対象物質の光選択吸収と結びつけるためには、さらに若干の処理が必要である。その第一として、眼への入射光に含まれる光の種類を考えてみよう。物体から出て来た光を含め入射光は、次の4種を

(1) 光 源, (2) 物質による光の選択吸収, (3) 網膜における刺激発生, (4) 大脳における色知覚発生

図1 色感覚発生のプロセス

(i) 拡散反射光 (ii) 鏡面反射光, (iii) 周辺からの反射光, (iv) 光源光および周囲からの反射光

図2 眼への種々の入射光

含んでいる(図2)。

(i) 拡散反射光: 物体内に入射した光は吸収, 散乱, 反射, 屈折等をうけた後再び物体外に反射光として出される。物質の選択吸収に関連した反射光である。

(ii) 鏡面反射光: 物体表面で鏡面反射された光で, 光源と同じ分光学的組成をもつ。この故に物体が白っぽく見える。

(iii) 周辺からの反射光: 対象図形の近隣からの反射光である。特に遠くから小さな図形を見る時, 近隣の反射光の影響は大きい。

(iv) 周囲からの反射光: 光源光も含む。

以上のような環境のもとで, 我々は物を見ている訳であるが, 一方, 分光光度計を用いて測定された反射スペクトルは上述の(iii), (iv)を除去した場合に相当する。従って, 小さな穴を開けたスクリーン(リダクションスクリーンと言う)を通して, 対象物を見た場合がこれに当る。

我々は形ある色を見ることが多い。葉の形は緑を連想し, その故に眼への入射光強度が弱く, 色感を発生するに充分な強度がない場合でも, 緑色を感じると言われている⁹⁾。大腦における色知覚の故である。上述のリダクションスクリーンは, 当然対象物の形をも捨てることになる。

3. 色刺激発生とYoung-Helmholtzの理論

図1の色覚発生プロセスにおけるⅡの過程で, 眼に入射した光は網膜上に視覚イメージを結ぶ。その光を網膜中の受容細胞が吸収し, 神経電流を発生し, 神経イメージをつくる。Grassmannの基本法則によって⁷⁾, 色刺激は3つの独立な量で決定されるから, 網膜上の受容細胞が3種類あることになる。事実, 受容細胞としては明るさを感じる柱状の桿体細胞と錐体の錐体細胞があり, 後者には光吸収の異なる3種類以上のものがあることが分っている。これらの細胞が光吸収に差をもっているのは, 含まれている視物質(色素)が異なるためである。主

な視物質の吸収スペクトルは表1のようなのである。これらの視物質は生体内において, アルコール脱水素酵素の働きでビタミンAがアルデヒド(レチナール)に酸化され, さらに蛋白質と結合してできる。大変興味深いことは, これらの視物質の発色団が, 何れも同一の π 電子系である点である。しかも, 3原色に相当した視物質があることは次のような理由からである。まず共通の発色団部分は, 11-cis-レチナールが蛋白質のアミノ基とシッフ塩基型結合で連結したものである。シッフ塩基型窒素にプロトン付加したもの, また解離したカルボキシル基イオンからの静電場の影響をうけているもので, 吸収スペクトルの異なる視物質となる(図3)。分子軌道理論による計算結果を表2に示した⁸⁾。これらの視物質が光を吸収すると, 共役二重結合系はall-transとなり, イミン結合が切れ, all-trans-レチナールが再生される。この時蛋白質構造が変化し神経電流を発生するのである。色刺激発生を引き金となるのは, オレフィンのシス体からトラン体への光異性化である。なお, all-trans-レチナールはレチナール異性化酵素により, 11-cis 体に戻り,

表1 視物質のスペクトル

視物質	最大吸収波長/nm
Rhodopsin	498
Porphyropsin	522
Iodopsin	562
Cyanopsin	620

斜線部分は蛋白質+脂質(オプシン)部分を示す
黒丸はメチル基

図3 視物質のモデル構造

表2 視物質モデルのスペクトル(計算)

	retinal		備 考
	(1)	(2)	
N ⁺	597	641	シッフ窒素にプロトン付加の場合
N	387	422	—
N ⁺ (CO ₂ ⁻ 6Å)	535	575	N ⁺ -CO ₂ ⁻ 間距離が6Åの場合

視物質を再生産するが、レチールがこのサイクルにおいて消耗するので、ビタミンAの補給が必要となるのである。以上のことは、桿体細胞の視物質であるロドプシンの吸収スペクトルが、視感度曲線によく対応すること、また光照射により吸収スペクトルが大きく変化し、レチールのスペクトルになることから明らかである。なお、受容細胞である桿体細胞・錐体細胞の電子顕微鏡写真も撮影されている。

さて色刺激の定式化について、最初でかつ最も素朴な Young-Helmholtz の理論がある⁶⁾。この理論の考え方は次のようである。受容細胞として赤、青、緑の光にそれぞれ感じる R , B , G の3種類を考える。光源の強度分布は、波長(λ)に対し $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ の単色光について $I_\lambda d\lambda$ とする。物体における反射率を R_λ とすれば、眼への入射光強度は $I_\lambda R_\lambda d\lambda$ である。この光を吸収した受容細胞の色刺激発生は当然入射光強度の関数である。Young-Helmholtz 理論では、最も単純に刺激発生は入射光強度に比例すると仮定する。このような仮定を混色メトリックの仮定という。受容細胞における比例定数を R , B , G に対してそれぞれ r , b , g とすれば、色刺激はそれぞれ $rI_\lambda R_\lambda d\lambda$, $bI_\lambda R_\lambda d\lambda$, $gI_\lambda R_\lambda d\lambda$ となる。光源が可視光領域の連続光源であれば、400~800 nm の領域で積分すればよい。

すなわち、

$$R = \int r I_\lambda R_\lambda d\lambda, \quad B = \int b I_\lambda R_\lambda d\lambda, \quad G = \int g I_\lambda R_\lambda d\lambda \quad (1)$$

となる。色刺激は $[R, B, G]$ で表わしうるベクトル量である。比例定数 (r, b, g) に適当な係数を掛けて和をとる、いわゆる1次変換を行えば、 $[R, B, G]$ も全く同じ1次変換をうける。1次変換のとり方により種々の表色系が生まれる。表色系としては、(a)色度計に付随した表色系、(b)計算に便利な表色系、(c)等色差性をもつ表色系、(d)色刺激発生機構に基づいた表色系に概略分類されている⁷⁾。上に述べた Young-Helmholtz 理論は(d)であるが、最も広く現在使用されている CIE 表色系は計算に便利であることを目的として用意された表色系である。すなわち、 $[r, b, g]$ の代りに、これらを1次変換した $[\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda]$ を用いる。従って、(1)式と同様に三色刺激値 $[X, Y, Z]$ が定義される。

$$X = \int \bar{x}_\lambda I_\lambda R_\lambda d\lambda, \quad Y = \int \bar{y}_\lambda I_\lambda R_\lambda d\lambda, \quad Z = \int \bar{z}_\lambda I_\lambda R_\lambda d\lambda \quad (2)$$

三色刺激係数は次の点に留意して設定された。

(i) Y がそのまま明度となる。従って $\bar{y}_\lambda$ は視感度に一

致する。(ii)色は XYZ の三角座標内の一点で表わしうるが、この三角座標内をできるだけ大きく、実在の色が占めるようにする(図4)。この故に三色刺激係数は実在色に対応した刺激係数とは異なる、仮想の受容細胞に対応したものとなる。

$S = X + Y + Z$ を全刺激という。 $x = X/S$, $y = Y/S$, $z = Z/S$ とすれば、 $x + y + z = 1$ となる。Grassmann 則に従って、3つの独立な刺激値を採用するには、 $[X, Y, Z]$ の代りに $[x, y, Y]$ でもよい。後者は色度 (x, y) と明度 (Y) で色刺激を表示したことになる。色度はこのように x, y 面上の一点として表示できる。 $0 \leq x \leq 1$, $0 \leq y \leq 1$ であるから、すべての色度は $(0, 1) - (0, 0) - (1, 0)$ の3点を結ぶ直角三角形内にある。 $X:Y:Z$ の比が同じであれば、 (x, y) は同じである。すなわち分光組成が同じ入射光による刺激は、入射光強度が異なっても、色度は等しい。

単色光の色度を色度面上にプロットすると $\widehat{VR}$ の弓なりの軌跡をとる。これをスペクトル色軌跡という。さらに V と R を直線で結び(純紫軌跡)、 $\widehat{VR}$ と $\widehat{VR}$ で囲まれた図形の中にすべての実在色の色度が入ることになる(図5)。

網目部分が実在の色を示す

図4 三色刺激値の三角座標表示

網目部分が実在の色を示す

図5 色度図

表3 色とスペクトル(波長)

波長(nm)	吸収光の色	補色	色の深浅
400-435	紫	黄緑	浅
435-480	青	黄	
480-490	緑青	黄赤	
490-500	青緑	赤	
500-560	緑	赤紫	
560-580	黄緑	紫	
580-595	黄	青	
595-605	赤	緑青	
605-705	赤	青緑	深

吸収光の補色が我々の感じる色となる。表3に示したように、波長と色とのつながりは我々にとってはなじみ深いものである。従って、色度をスペクトル色の波長で表わしたとすれば、心理的要素を加味した表示系となるであろう。スペクトル色を用い、かつ $[X, Y, Z]$ あるいは $[x, y, Y]$ と等価な表色系は次のようにして導かれる。いま、二色を混合した場合を考える。混色メトリックの仮定をしているので、 $C_1 = [X_1, Y_1, Z_1]$ 、 $C_2 = [X_2, Y_2, Z_2]$ として、

$$\left. \begin{aligned} C &= C_1 + C_2 \\ X &= X_1 + X_2, \quad Y = Y_1 + Y_2, \quad S = S_1 + S_2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

従って、色度 (x, y) は

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{S} = \left(\frac{S_1}{S}\right) x_1 + \left(\frac{S_2}{S}\right) x_2, \\ y &= \frac{Y}{S} = \left(\frac{S_1}{S}\right) y_1 + \left(\frac{S_2}{S}\right) y_2 \end{aligned} \quad (4)$$

となる。このことは混色の結果、色度 (x, y) は色度面上の C_1 、 C_2 に対応した二点を結ぶ直線上の点となることを意味する。 C_1 を白色(光源色)、 C_2 をスペクトル色とすれば、任意の色刺激は、白色とスペクトル色の混色として表示できることになる。 C_1 は光源色(表4)である

表4 標準光源の色度

光源	x_0	y_0
A	0.4476	0.4075
B	0.3485	0.3517
C	0.3101	0.3163

ので定点となる。 C_1 に対するスペクトル色の混合率(p)を用いれば、

$$x = (1-p)x_1 + px_2, \quad y = (1-p)y_1 + py_2 \quad (5)$$

となる。 p を刺激純度という。 C_2 の色度 (x_2, y_2) はスペクトル色の波長を指定すれば定まる。この波長(λ_d)を主波長という。従って、色刺激 C の色度を (λ_d, p) で表示することができる。 (x, y) が直座標表示であるのに対して、 (λ_d, p) は光源色の色度を原点として動径(p)、角度(λ_d に対応)を用いた極座標表示である。故に (x, y) と数学的には等価であり、完全に心理的要素を加えている訳ではないが、我々の心理的観念に近い表現となっているので、理解し易く、広く利用されている。

眼の構造は屢々カメラに対応されているが、根本的に両者は異なる。カメラは感光フィルムの感度を一定にして、光量を絞り(面積)×シャッター(時間)により調節する。一方、眼は絞りに相当した虹彩の面積で光量を調節するのみで、網膜上における感度を自動的に調節しているのである。弱い光では網膜上の神経電流が強調され、強い光では拮抗をうける。これは網膜内の神経回路によるもので、Young-Helmholtzモデルのように光受容細胞から単純に神経束につながっているのではなく、横方向にも連絡があり、受容細胞における刺激の強調・拮抗が行われるのである(図6)。従って上述の表色系では実在の色の表色に不十分な点がある。そこで三色刺激値を基盤として、種々の表色系が工夫されている¹⁾。しかし、

(a) Young-Helmholtz モデル
(R, G, Bの受容細胞において色刺激発生)

(b) 実際の神経回路(モデル)
(光は網膜を通り抜け色素上皮で反射され吸収される)

図6 網膜における神経回路

本稿では色刺激と吸収スペクトルとのつながりを考察することが目的であるので、表色系については省略する。

4. 物性量と心理物理量

色素化学の立場からすれば、心理物理量と物質の構造との関係が重要な課題である。この場合の心理物理量は物質の物性量であることが必要である。物性量としては、試料の濃度・大きさ・形状に無関係であることが要請される。例えば光吸収の強度は吸光度(A)で表わしうが、Lambert-Beer則が成立する条件で、(6)式で与えられる分子吸光係数(ϵ)は上述の意味での物性量である。

$$\epsilon = A/cl \quad (6)$$

ただし、 c =濃度、 l =液層の厚さとする。

では心理物理量の中から物性量を抽出することができるであろうか。

まず、(1)あるいは(2)式で与えられる心理物理量を基本とするので、反射スペクトルと吸収スペクトルの関係を考察しておく。反射率(R)の濃度依存性はKubelka-Munk式で与えられる¹⁰⁾。

$$(100-R)^2/2R = (K/S) \quad (7)$$

K/S は吸収(K)と散乱(S)の項である。散乱項に差がなければ、 K/S は吸収スペクトルに対応したものと考えてよいであろう。(7)式から明らかなように、 R は濃度に対して非線型であるので、(6)式のような物性量を R から誘導できない。(100- R)は光吸収に相当するが、当然のことながら吸収スペクトルに比例しない。しかし、(7)式から分るように、(100- R)と吸収スペクトル(K/S)の極大、極小波長は一致する。また肩(shoulder)の波長も一致するが、湾曲点は一致しない。

さて、 K/S にガウス関数型の波数依存性を仮定して、モデル的に三色刺激値を計算し表5に比較した。

$$K/S = A \cdot \exp(-m(\sigma - \sigma_0)^2) \quad (8)$$

A は濃度に比例する項である。 σ_0 は最大吸収波数(cm^{-1})で、 m はスペクトル幅($2a$)に対して、 $m=1/2a^2$ である。スペクトル幅=2000 cm^{-1} とすると、 $m=0.69315 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$ となる。計算の結果、明度、刺激純度は濃度により変化したがる、主波長(λ_d)は濃度にはほとんど依存しないので、物性量として採用してもよいであろう。しかも幸なことに、これは吸収スペクトルの極大波長と近似的だが補色の関係にある。このことは、吸収スペクトルを用いて色を語りうる重要な手掛りを与える。

5. 鮮明さと吸収スペクトル

ポリアクリロニトリル用染料として、カチオン染料が使用されるようになり、色度に加

表5 極大吸収波長・極大吸収波長(補色)・主波長

$\sigma_0/10^3 \text{ cm}^{-1}$	λ_0/nm	λ_0^c/nm	λ_d/nm
25	400	578	582
20	500	607	618
16.7	600	496	491

え鮮明色に関心が集められるようになった。色度・明度の心理物理量に加えて、幾つかの高次心理物理量がある。鮮明さ・濁り・白っぽいなどのほか、渋い、いきなどむしろ文化的色彩の心理量もある。これらは、図1における色感覚発生プロセスのⅢの過程によるもので、すでに述べたように、心理物理学的議論をさせて来た。この故に、吸収スペクトルとのつながりで鮮明さを考察することは合理的でないように思われる。しかし、心理物理量の範囲で鮮明さを考察する方策は見出せないであろうか。真の鮮明さを対象とすることは可能でないまでも、吸収スペクトルとのつながりを考察してみることは意味のあることのように考えるからである。

鮮明色とは一口で言えば、明るく、純粋でかつある程度の濃度を有する色であると言えるであろう。純粋さは刺激純度(p)を目安にしようとする。 p が大きいく、スペクトル色に近いから、吸収スペクトル幅が狭い程純粋な色で、従って鮮明となりうると考えるかも知れない。しかし、これが誤りであることは次のように考えればすぐに分る。反射スペクトルは図7のように2つのタイプに分けうる。図における(b)は緑、(a)は緑を除いた色に相当する。(a)の場合、スペクトル幅が大きければ明度は低く、 p も小さい。スペクトル幅が減少すれば、明度も純度も増加する。さらにスペクトル幅が減少すれば、明度は光源の明度に近づくが、純度 $\rightarrow 0$ に収斂する。従って、適当なスペクトル幅で純度は最大となる。(b)の場合にはスペクトル幅の減少とともに、明度は減少する。スペクトル幅 $\rightarrow 0$ に対して、 $X \rightarrow 0$ 、 $Y \rightarrow 0$ 、 $Z \rightarrow 0$ となるが、 $x \rightarrow x_d$ 、 $y \rightarrow y_d$ (添え字 d は主波長における値であることを示す)であるから、 $p \rightarrow 1$ となる。すなわち、スペクトル幅の減少とともに暗いスペクトル色となる。

図7 反射スペクトルのタイプ

- (a) 明度 40% の最明色
 (b) 明度 60% の最明色
 (1) 反射スペクトルタイプ, (a) $\lambda_{\max} = 400 \text{ nm}$
 (2) 反射スペクトルタイプ, (a) $\lambda_{\max} = 500 \text{ nm}$
 (3) 反射スペクトルタイプ, (a) $\lambda_{\max} = 556 \text{ nm}$
 (4) 反射スペクトルタイプ, (b) $\lambda_{\min} = 532 \text{ nm}$

図8 スペクトル幅変化にともなう色度変化と最明色

以上のことを具体的に見るために、(8)式の吸収スペクトルを用い、スペクトル幅(a)を変数として色度の変化を追跡した。結果を図8に示す。モデル計算の結果であるが、上述の傾向をよく示している。緑色以外の場合、最高の純度を与える場合のスペクトル幅は $1000 \sim 2000 \text{ cm}^{-1}$ であった。多くの染料のスペクトル幅は 2000 cm^{-1} 以下となることはない。従って染料のスペクトル幅が狭い程、刺激純度が高くなるのである。

鮮明さは刺激純度と明度の関数であろう。こうした取り扱いには未だ成功していないが、図8の軌跡にMcAdamの最明色(同一の色度で明度最大)¹¹⁾の軌跡を重ねて見れば、明らかなように明度に応じて最適のスペクトル幅が存在する。これよりもスペクトル幅が広くても狭くても、鮮明さを失うと理解できるであろう。

6. 結 び

色彩の問題は文化の問題として扱うか、知覚現象と見るか。あるいは視覚イメージを神経イメージに変換した色刺激と考えるか。我々の自然科学的手法は、いわゆる分光学的色彩論で、色彩の課題をはんの一部をカバーしうるにすぎない。ましてや、色=吸収スペクトルに短絡することは早計である。それにもかかわらず、吸収スペクトルを基盤にして、どの程度まで色彩の課題に切り込むことができるか。また、それにはどのような手段がありうるか。本稿はこの点に焦点をあて、幾つかの問題点を取り挙げつつ述べた。紙数の都合および著者の理解不足から、あるいは不十分な記述があるかも知れないが、色彩論は見通せない程の壮大な大パノラマの如きものであると言う著者の実感を共感して頂ければ、幸いである。

文 献

- 1) モーリス・デリベレ, 久保田浩資訳, 色彩, p.88, 白水社(1971)
- 2) 前田雨城, 日本古代の色彩と染, p.24, 河出書房(1975)
- 3) モーリス・デリベレ, 久保田浩資訳, 色彩, p.20, 白水社(1971)
- 4) 木村直司訳, 色彩論, ゲーテ全集 14, 潮出版社(1980)
- 5) 木村直司訳, 科学方法論
- 6) 金子隆芳, 色の科学, p.143, みすず書房(1968)
- 7) 東 堯, 色, p.4, 生産技術センター(1977)
- 8) Hideo Suzuki, *Suppl. Prog. Theor. Phys.*, **46**, 16 (1970)
- 9) 日本色彩学会編, 色彩科学ハンドブック, p.83, 東大出版会
- 10) 日本学術振興会染色加工第120委員会, 新染色加工講座 1, 染料・顔料, p.280, 共立出版社(1971)
- 11) 日本色彩学会編, 色彩科学ハンドブック, p.113, 東大出版会

(昭和62年2月7日受理)