

翻 訳

R. ルーター

色刺激メトリックの話題から

R. Luther, Aus dem Gebiet der Farbreizmetrik
Zeitschrift für technische Physik, 1927, Nr. 12, 540-558

金子 隆芳 Takayoshi Kaneko

名誉会員

訳者まえがき

本論文は講演録に基づいているらしく、論調もインフォーマルなところがあるが、いわゆるルーター条件やルーター・ニベルク色立体の原典として、その都度引用される文献である。内容的に二部構成であるが、主体は第1部にあり、本稿はその訳である。第2部は技術論で、ここは訳者の及ぶところでないので割愛せざるを得ない。フィルターの分光透過に関するルーター条件は第2部に見られる。本論文の出た1927年はCIE(1931)XYZ系の登場前夜で、XYZ系に馴染んだ今日から見れば戸惑いもあるが、かえってそこに色彩学の生な側面が見られる。訳文の至らぬところは図解などを通し、読者の慧眼をもって補っていただきたい。

ルーター Robert Luther(1868/1867–1945)はモスクワに生まれ、大学はDorpat(Estonia)に化学を専攻した。これはオストワルトの母校でもある。卒業後、セントペテルスブルクの工科大学で助手を務めたが、1894年、ライプチヒ大学に再入学した。そこに化学の教授としてオストワルトがいた。1896年卒業、オストワルトの私設助手、1899年、ライプチヒ大学私講師、1904年、員外教授を経て、1908年、ドレスデンに開設された写真工科大学に正教授として招聘され、1936年の定年まで、その職にあった。オストワルト(1853–1932)は1906年にライプチヒを退職しているが、ルーターがその後を襲うことはなかったということである。ルーターは1945年4月17日に同地で亡くなっているが、翌5月、ドイツ降伏、爆撃による廃墟のドレスデンであった。

実はルーターの色彩学の著述は少なく、本論文は色彩学の引用文献を通して知られるほとんど唯一の著述である。森礼於氏(故)によれば、彼は宗教改革のマルチン・ルーターの従兄弟の後裔だそうである(本学会編 色彩科学事典 朝倉書店 p.254)。

アブストラクト

第1部は色モメント量に基づいて古典的色彩論を拡張し、新たなパラメーター・トリアドを論じるが、それによって構成される三次元色立体は、とくに色素の色の特性の説明に有効である。第2部は測色技術、異色測光、三色写真の諸問題である。

1. 時間が限られているので、本論は論理的に構成された総説ではなく、演題が示すように色彩論の一分野から、いくつかの関連する話題を述べるにとどまる。どういう話になるかは個人的関心によるが、その上でそれらの問題の基本論を簡潔に述べたい。

筆者の仕事や思索は筆者の専門領域の実際的技術的問題に始まり、そしてそこに戻るということを強調したい。すなわちカラー写真、立体写真、オルソクロマジー、暗室照明、測色法、異色測光などである。演題のとおり、ここでは色刺激についてもっばら論じるが、色刺激とはそれによって惹起される色感覚と別にフォン・クリースが命名したものである。筆者は全体としてシュレジンガー¹⁾のいう低次の色メトリックの方向を指向するもので、もちろん異色測光の概念を使用する。言い換えればヘルムホルツ、ヘリンク、フォン・クリースらのいう色覚の領域には立ち入らない。その上で現在あまり知られていないと思われる問題を取り上げたい。古い色彩論に不必要に立ち戻ることはしない。近年、これらの分野の解説書²⁾は多い。

スペクトル組成は異なるのに、一定の条件のもとで同じ感覚を引き起こす色刺激をオストワルトに倣ってメタマーと呼ぶならば、古典的色彩論とは要するに、有彩色であろうと無彩色であろうと、メタメルな色刺激の生成の研究ということができる。

2. 正常な色覚を有する眼の錐体視で、そしてカット³⁾のいう還元色という一定の観測条件のもとで、ここに問題とする関係の全体が三次元構造であることは周知のことである。すなわち任意の色刺激は、三つの適当に選ばれた互いに独立なパラメーターによって完全に規定できる。

一つのパラメーター・トリアドから、いくらでも新しいトリアドを導くことができる。そこでも全く同じように完全に色刺激を規定し、その事実関係を表わすことができる。

本論の第1部は、とくにこれまで使われることのなかったパラメーター・トリアドに関するものである⁴⁾。いろいろな選択枝の中で、ここでは一般性というよりは実際の観点に的をしぼることとする。直観的で、できるだけ簡単に、できるだけ多くの関係を見ることのできるシステムを考える。それによって実際の仕事は簡単になり、もしかしたら新しい関係がわかるかもしれない。明らかな変形や一般論には言及しない。

3. まず周知のヤング-ヘルムホルツ-マクスウェルのいわゆる三色系から始めよう。

このシステムでは、スペクトル刺激から任意に合成された色刺激は、そこに含まれる三つの独立な、それ以外は任意の要素刺激、あるいはフォン・クリースのいう原刺激の量によって一義的に規定できる。

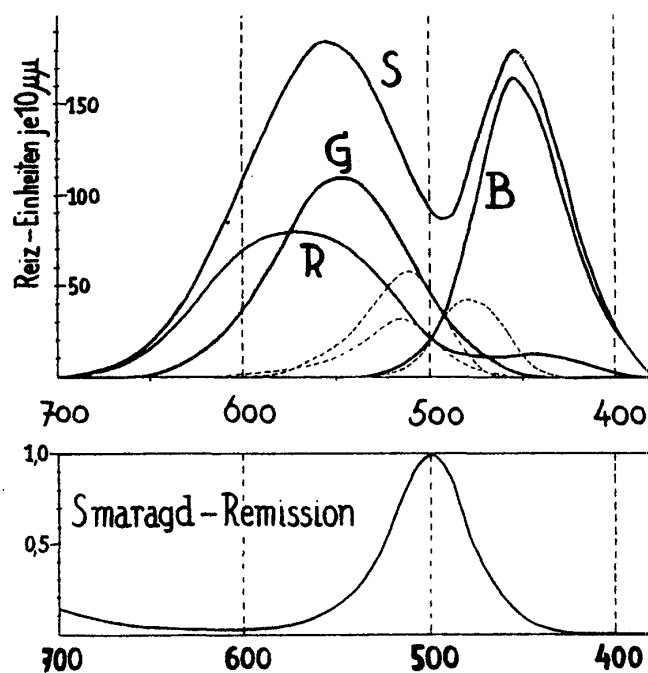


図1 昼光スペクトルの原成分(上図実線)と、エメラルド反射光のスペクトル三原刺激量(上図点線)。エメラルド反射光のスペクトル(下図)。

この場合、すべて混合刺激はスペクトル刺激の合成であるから、スペクトル原刺激量がもとなる。図1(上)の曲線は昼光スペクトルのそのような原刺激量⁵⁾で、これを実験的に求めた史上最初がマクスウェルであった。横軸は正規スペクトルの波長であり、縦軸は赤、緑、青の三つの原刺激量 R 、 G 、 B とその和 $S(=R+G+B)$ で、スペクトル波長幅 $10\mu\mu$ 当りの値である(訳註： $\mu\mu$ は原文のまま)。

合わせて白色になるような三原刺激量は、通常、互いに等しく、それぞれ1000刺激単位とし、したがってスペクトル全体から合成された白色の刺激和は相対値として

$$S_w = \int_{380}^{700} S_w(\lambda) d\lambda = 3000 \text{ 刺激単位}$$

となる。白色の三原刺激の等量性は、図1(上)の三つの原曲線の占める面積が互いに等しいということである。すなわち；

$$\begin{aligned}
 R_W &= \int_{700}^{380} R_W(\lambda) d\lambda = G_W = \int_{700}^{380} G_W(\lambda) d\lambda \\
 &= B_W = \int_{700}^{380} B_W(\lambda) d\lambda = 1000.
 \end{aligned}$$

ここにスペクトル刺激の混合があるとき(たとえば太陽光のもとでエクスナー⁶⁾が測定したようなエメラルドSmの反射光)、その反射スペクトル(図1下)から三つの原刺激量を簡単に計算できる。すなわち十分多くの数の波長区分ごとに、原曲線の縦軸に、そこに落ちる当該波長の光の反射成分を掛け、そうして得られた面の面積を求める。たとえば赤については次の通りである。

$$R_{Sm} = \int_{700}^{380} R_W(\lambda) R_{m_{Sm}}(\lambda) d\lambda$$

4. 実際の測定作業では、この面倒な計算の簡便法がある。たとえば R_{Sm} の測定の場合、横軸距離の等増分が太陽スペクトルの赤刺激量の等増分に比例するようにスペクトル波長目盛を調整する。すなわち図1の R 原曲線を λ 上で積分し、 R の増分量(図2)に応じてスペクトル波長分割を行う。同じことを G 、 B の原曲線についても行い、最後に調整のために S 曲線についても行う。

そのような座標の縦軸目盛に反射スペクトルの単位をとれば、あとは反射スペクトルの縦座標をそのまま載せればよい。そのときの曲線下の面積 η が三原刺激量になる。図3はエメラルドの反射スペクトルについて、この操作図式を示す。

その結果、エメラルドから発する混合刺激は、赤原刺激が198、緑原刺激が317、青原刺激が198、全体として713刺激単位である。

5. これはエメラルドの色の完全な表示ではあるが、その色がどんな色か、よくわからない。そのような直観性のためには分数

$$r = \frac{R}{S}, \quad g = \frac{G}{S}, \quad b = \frac{B}{S}$$

をとって、これを三角座標(まずは正三角形)の三つの原刺激に対して記入する。これをスペクトル刺激や当該の混合刺激について行う。エメラルドは $r_{Sm} = 0.28$; $g_{Sm} = 0.44$; $b_{Sm} = 0.28$ である(図4上)。

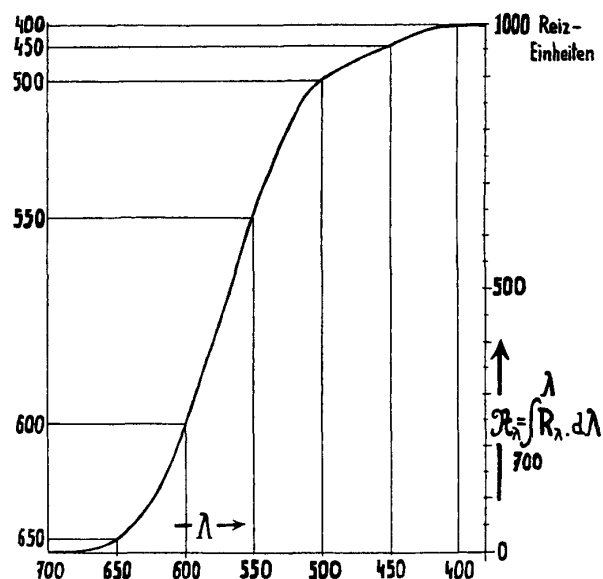


図2 赤原刺激の等量増分のためのスペクトル分割。

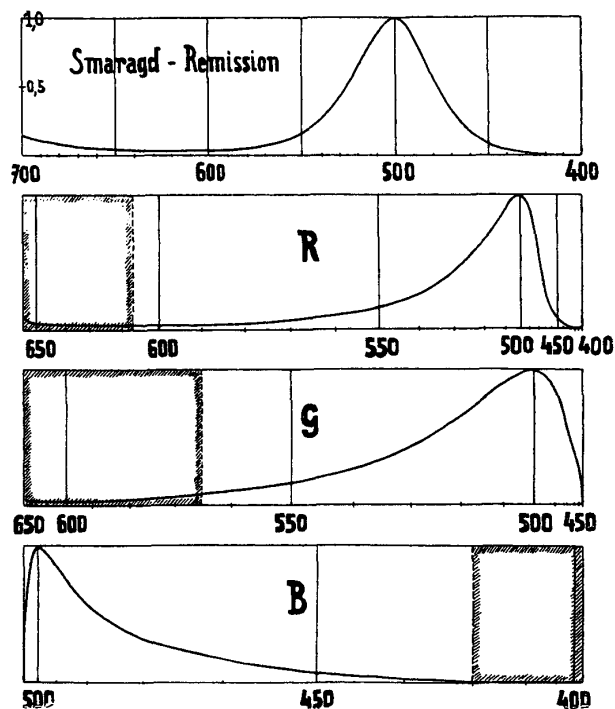


図3 図2による分割スペクトルを利用したエメラルド反射スペクトルの三原刺激の定量。

ニュートンの色の重心理論によると、このような色図上のスペクトル刺激にはつぎのような直観的意味がある。すなわちこのスペクトル色曲線の10μμごとに赤、緑、青の錘が下がっており、その重さは図1のスペクトル三原刺激値に比例する。そのとき白色(または無彩色)の点Uはその重心で、システムを平衡に支える。その支点到すべての錘の和(すなわち白の刺激和)に等しい錘が載っていることになる。また三つの色の錘を色別に三角形の頂点にまとめても、平衡は

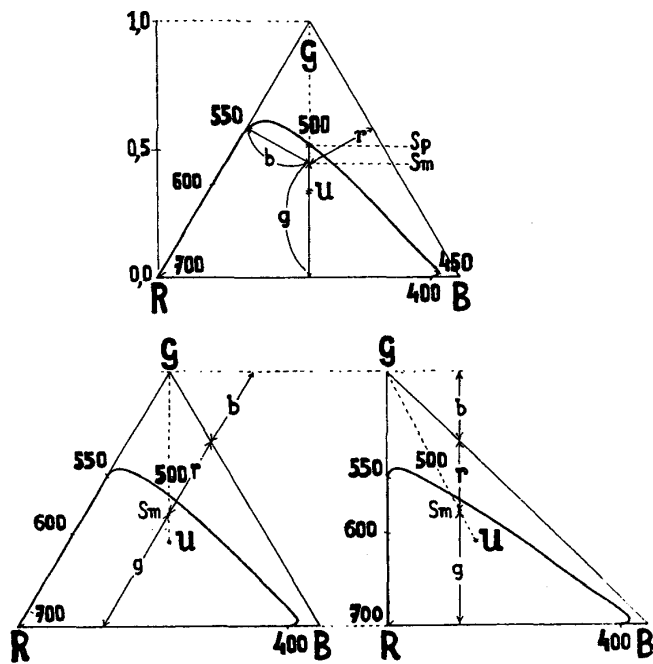


図4 三原刺激比率による色図上のエメラルド刺激の位置
(上)と色図の平行投射(下)。

保たれる。こうして白色(無彩色)刺激に有彩色のスペクトル刺激の平衡状態が対応し、それは互いに補って、どちらにも傾かない。

有彩色の混合刺激には、色図上、無彩色点とスペクトル曲線($\lambda = 380 \mu\mu$ と $\lambda = 700 \mu\mu$ を結ぶ純紫直線を含む)との中間にある重心点または支点が対応する。例えばエメラルドには三つの原刺激の分量を座標とする点Smが記入されている。

図4下は別の記入図式である。多くの場合この方が便利で、とくに色図を平行投射によって直角三角形に変換するときそうである。このようにしてもニュートンの重心平衡はそのままに、使用することができる(図4下右)。

色図上の位置から、エメラルドの色調(訳注:波長を変数とする色特性次元)は波長 $\lambda = 500 \mu\mu$ に対応することがわかり、ニュートンの重心の法則から、これを $\lambda = 500 \mu\mu$ の緑のスペクトル刺激(Sp)と無彩色刺激(U)との合成と考えることができる。スペクトル刺激と無彩色刺激の刺激全体に対する分量比は槌子の比、すなわち $\frac{U - Sm}{U - Sp}$ および $\frac{Sm - Sp}{U - Sp}$ で与えられる(図4上参照)。エメラルドの場合、全刺激量713のうち0.40が無彩色に、0.60が緑のスペクトル刺激($\lambda = 500 \mu\mu$)になる。このようなスペクトル刺激の分量比を飽和度または色飽和度(刺激単位)という。

色調、飽和度、強度(ニュートンの意味での全重量、

刺激単位でいえば刺激和)をグラスマン-ヘルムホルツのパラメーター・トリアド⁹⁾とみなすことができる(単色系)。これもまた色刺激を一義的に容易に直観できる形式である¹⁰⁾。

6. 強度と飽和度の計算における刺激単位は、三色系ごとの特性に依存するという意味で不満足かつ面倒で、実はグラスマン-ヘルムホルツ系はこれをとらない。グラスマン以来早くから、強度のような恣意的に選んだ刺激単位に代わって、実験的に独立に定義できる測定量、すなわち明度(正確には面の明度)をとる必要があった。筆者はここで異色測光の概念のフォン・クリースの批判にも、シュレジンガーのこれに関する詳説¹¹⁾にも立ち入らず、もっぱら実験的立場をとる。

一連の実験でフォン・アイヴズ¹²⁾は、彼の使用した異色測光法はかなりばらつきながらも、一つの例外¹²⁾を除けば、結果的にスペクトル刺激の波長と明度との関係 H_λ は、実用的には一致することを示した。さらに明度の測定値には、測定誤差と個人差は避けられないものの、その範囲内で十分に加法性が成り立つことがわかった¹³⁾。

混合刺激の色調と飽和度とに無関係に測定できる明度 H の存在と、刺激合成におけるその加法性

$$H = \int H_\lambda d\lambda \text{ を仮定すれば、任意の合成刺激の明度}$$

H は、それに含まれる原刺激量の線形結合で計算できる。

$$H = \rho R + \gamma G + \beta B$$

通常の三原刺激はいわゆる赤、緑、青であるが、青原刺激の明度を示す係数 β は ρ と γ に対して非常に小さい。

7. 刺激単位から明度単位に移ることで、原曲線と色図はどのように変わるであろうか。

スペクトル原曲線は、その縦座標にそれぞれ係数 ρ 、 γ 、 β を掛けることになる。それによって刺激和曲線Sは明度和曲線、つまりはスペクトル明度曲線 H の形になる。

色図の変化はつぎのように考えると説明できるが、これは後に別の意味でも役に立つ。

色図のスペクトル曲線の $10 \mu\mu$ ごとに無彩色点Uから発する(白色中心の)導線は、ニュートンの重心構造によれば、互いに固定されて白色点で支えられた槌子のシステムで、その端にはそれぞれ $10 \mu\mu$ 幅のスペクトル切片の刺激和の錘が下がっているものと考えら

れる。

刺激単位を明度単位に置換してもニュートンの平衡はスペクトル刺激にも原刺激にも成り立つから、そこで明らかなことは、すべての槌子(白色中心の導線)の方向は変わらず、新たな錘の重さと槌子長に関して、槌子長と錘の積(すなわち白色中心のモーメント)が変わらぬように変わるということである。

図5は刺激単位の重さ計算から明度単位の重さ計算への移行を図式的に示している。下図は三つのスペクトル原曲線の変換と、スペクトル刺激和曲線Sのスペクトル明度曲線Hへの変換である。上図はそれに対応した色図の変化である¹⁴⁾。青刺激の槌子が、方向は変わらないが、錘が非常に小さいために、いかに長くなるかわかる。

スペクトル槌子モーメントはこのような色図の変化に対して不変で、どちらの色図においても(レトルト型の)曲線M¹⁵⁾のように、白色中心を極として記されている。他方、左の図の同じく極座標的に記入された点線のスペクトル刺激和曲線Sは、右の図ではそれに対応して記入されたスペクトル明度曲線H¹⁶⁾に変わっている¹⁷⁾。

変換係数 ρ 、 γ 、 β は原刺激のとり方に依存する。係数 β はいつも小さく、場合によってはゼロまたは負数にもなる¹⁸⁾。筆者が採用した三原刺激はもともと $\beta=0$ ¹⁹⁾であった。すなわち無限に小さい重さの青の原刺激が無限に長い槌子に付いていることになる。しかし槌子のモーメントは有限の不変値である。

新しく明度単位で言うと、グラスマン-ヘルムホルツ

の単色系において、エメラルドの特性値は、明度=全スペクトルの0.26=515明度単位、飽和度=0.63である。

8. モメントを導入することで、新しいパラメーター・トリアドができる。それは直観性以外にも多くの利点がある。

一つの混合刺激のニュートンの重心平衡を、三つの作用点(色図の三つの原刺激点)の代わりに、色図平面の二つの平行でない軸に関係づけることができる。すべての錘がこの二つの軸に作用する回転モーメントを計算の基礎にするのである²⁰⁾。

色調の心理学的配列(いわゆる四色系)に倣って、無彩色点を通る二つの軸を緑-紫と青-黄の方向にとり、直観性を高めるために、図6のように斜交軸を平行投射して(錘はそのまま)直交軸に変換する。白色中心の各モーメントを二つの直交成分に、すなわち緑-紫と青-黄の2軸の周りの二つの回転モーメントに分解すると、つぎのような関係が得られる。

たとえば緑-紫軸の右から作用するすべての錘の回転モーメントは青の回転モーメントになる。要するにヘリンク的な青になる。この青は緑-紫軸の左側から作用する錘の黄の回転モーメントに対抗する。黄の回転モーメント全体は、再びヘリンク的な意味で混合刺激の黄である。黄が青より大きければ、モーメント全体は黄の色調になり、その逆も同様である。二つが等しければ全体モーメントはゼロで、青でも黄でもない色調になり、色は緑-紫の線上にある。つまり青マイナス黄が基準となる。

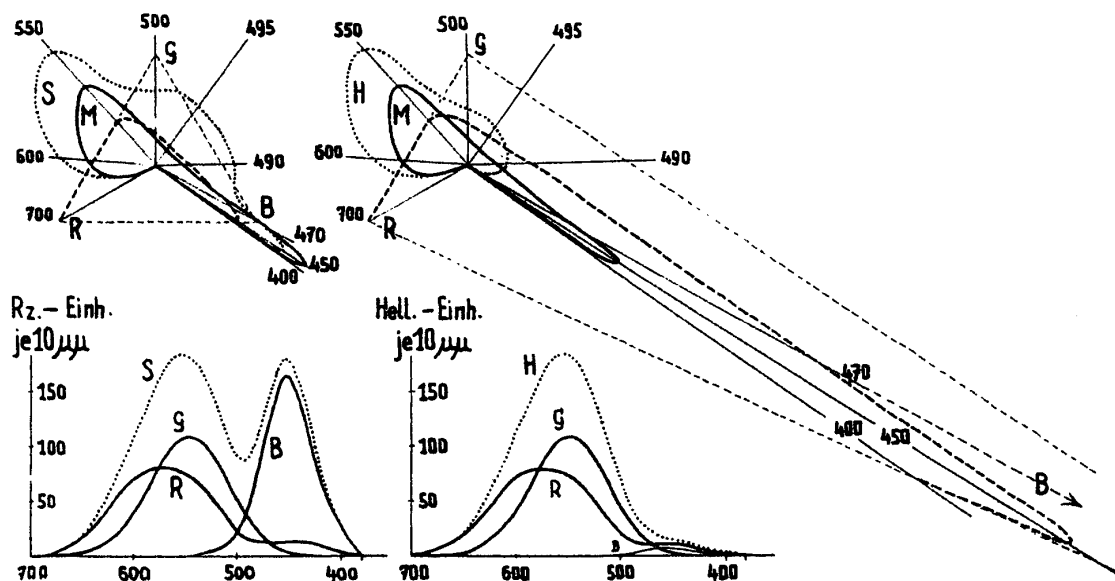


図5 刺激単位から明度単位への移行による色図(上)と原曲線(下)の変化図式。極座標型モーメント曲線Mは不変。刺激和曲線Sは明度曲線Hになる。

青-黄軸に作用する緑と紫のモメントについても同じように考え、ヘリンクに倣って緑-赤(緑マイナス赤)について言うことができる。(ヘリンクの赤は同じく赤といわれる原赤よりも、黄みが少なく、紫が多い。ヘリンクを示す添字(H)によってこれを区別する。)

緑・赤⁽⁺⁾と青・黄の二つのモメントと、刺激の重さ(刺激単位または明度単位)とで新しいパラメーター・トリアド²¹⁾ができる。それによって任意の色刺激を一義的に、まさしく直観的に規定することができる。

二つの回転モメントにはベクトルと同様な加法性があり、その関係を表す記号と比率によって色図上の方向がきまり、それによって結果的に白色中心的な色モメントの色調を直観的に表す。それはたぶん色味とアナログカルである。これらの白色中心的色モメントを刺激の重さで割れば、白色中心的な梃子の長さとして、それによって色図の中の刺激の位置が決まる。そこから飽和度、すなわち三つの原刺激の割合と量が直ちに与えられる。ここに四色系、三色系、単色系の相互変換の手がかりがある。

9. 吸収あるいは反射スペクトルの合成的混合刺激（たとえばエメラルド・スペクトル）について、第3節におけると同様に、二つの原モメントと刺激和または明度を求めることができる。それにはまず正規スペクトル上に $10\mu\mu$ ごとに二つの原モメントを縦座標として記入する。この曲線（図7）は原刺激量から1次式²²⁾で

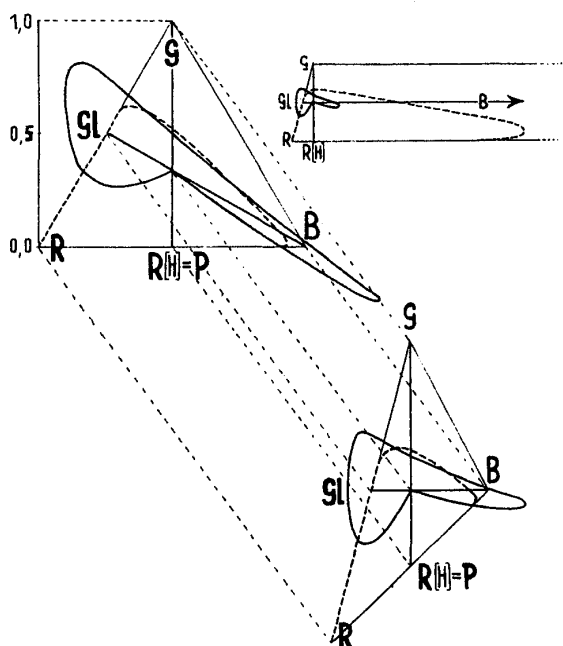


図6 斜交モメント軸の正三角形色図から、直交モメント軸の色図への平行投射変換。さらに明度単位の色図へ変換(右上挿図)。青刺激の明度はゼロに等しい。

計算できる。

$$M = mR + nG + pB$$

《白色昼光スペクトルについていえば(図7実線)、赤^(H)モメント曲線と横軸との間の面積、すなわちすべてのスペクトルの赤^(H)モメントの和は、緑モメント曲線の対応する面積に、符号は反対だが等しい。同じことは青と黄のモメント曲線にも成り立つ。当然、無彩色の総合スペクトルの二つの原モメントはゼロである。》

ここでまた十分多くの波長区分をとって、これらの曲線にエメラルドのスペクトル反射率を掛け、符号を考慮しながら全体面積を求めれば、エメラルド刺激の二つの総合モメントが得られる。同じことを刺激和曲線Sまたは明度曲線Hについて行うことができる²³⁾。

このような操作の結果(図7の点線)、筆者の採用した基準値のもとでは、エメラルドの色の特性として青-黄=0および緑-赤^(H)=79モメント単位、重さは713刺激単位(総合スペクトルの0.24)または515明度単位(総合スペクトルの0.26)が得られた。

10. ここにスペクトル刺激合成のある特別なケースに注目する必要がある、それによって簡単な幾何学的記述ができる。そのスペクトル刺激とは、正

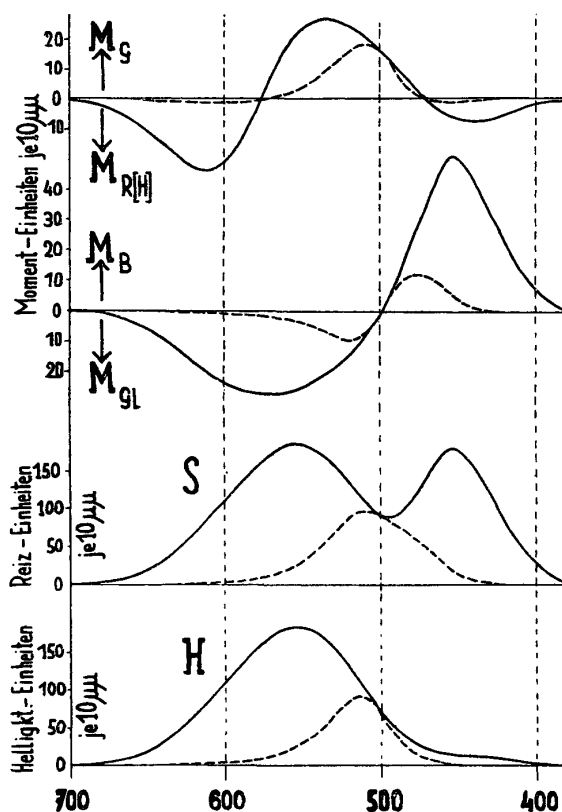


図7 二つの原モメントのスペクトル原曲線(上2図)と刺激和および明度のスペクトル曲線(下2図)。点線はエメラルドの反射スペクトルの当該曲線。

規スペクトルから全く減衰なしに、まとまった一部を切りとったものである。

そのあらゆる場合を一目で見るために、スペクトルを一つの円に閉じて考える(図8)。すなわち二つの半径を切片の両側として、波長 λ_1 と λ_2 との間に、その位置に応じて任意の長さの、まとまった非減衰的なスペクトル切片ができる。それは非常に鋭い境界の吸収帯域を有する色素の透過または反射スペクトルのような観念的なものだが、すべてそのようなスペクトル切片は、ある種の最大の特性を有することをオストワルトは経験的に発見し、シュレジンガー²⁴⁾はこれを理論的に証明した。すなわちそれは一定の飽和度で最大の明度、あるいは一定の明度で最大の飽和度の刺激である。(以下、それを最適な色素色刺激、または短く最明色と呼ぶ。) すべて普通の色素色刺激は最明色の明度を落とすことによって得られる。

二つの波長 λ_1 と λ_2 に強度(明度単位)を加えると、新たに一つのパラメーター・トリアドになる²⁵⁾。なお強度には絶対(対総合スペクトル比)と相対(対最明色比)とがある。これもまた色刺激を完全に規定するもので、マクスウェル・オストワルト型の混色器のような装置は、この方式で色刺激を再現する。エメラルドは $\lambda_1=561\mu\mu$ 、 $\lambda_2=458\mu\mu$ 、相対明度=

0.50、絶対明度=0.26である。このような λ_1 、 λ_2 、明度のトリアドの幾何学的表現は二色系といえることができる。

11. 同じ方向のモメントはスカラーのように加算できるから、一つのスペクトル切片の二つのモメント M は積分計算ができる。すなわち各波長のスペクトル・モメント M_λ を、スペクトルの一端($\lambda=700\mu\mu$)から一つは λ_2 まで、もう一つは λ_1 まで積分し、その差をとる。

$$M(\lambda_2, \lambda_1) = \int_{700}^{\lambda_2} M_\lambda d\lambda - \int_{700}^{\lambda_1} M_\lambda d\lambda$$

図8下は $\lambda=700\mu\mu$ から λ まで、 λ の関数として、モメント和またはモメント積分値を曲線で示してある。二つの曲線のそれぞれ二つの λ 値の縦座標値の差が、その λ 値によって切り取られたスペクトル刺激の二つの原モメントになる。

波長ごとに二つの曲線(図8)の縦座標値を2次元直角座標系に記入すれば、波長と明度(または刺激和)の二重目盛を与えられた曲線を描くことができる(図9)。これをスペクトル・モメント加算曲線という。この曲線はわかり易く、実際にも重要な性質がある。

すべての色刺激はベクトルで表されるが、最明色ベクトルはこの加算曲線の弦になる。最明色でない色(たとえばエメラルドSm)は、最明色の明度を落としたものとすれば、最明色の弦の一部になる。一つの最明色のスペクトル切片は時計回りに弦の始点と終点の間にあり、その波長域と明度は曲線上の二重目盛から読み取ることができる。

一つの弦は二つの直交する原モメントにベクトル分解できる。その絶対値と符号によって方向と、したがって色調が与えられる。平行な弦ベクトルは同じ色調の最明色であり、それは平行な接線(無限に狭い切片)にも、また付属する色図(図9右)にも読み取ることができる。

弦長は二つの原モメントの合成で、最明色の色モメントまたは彩度になる。補色の最明色は数値的に等しい逆の色モメント、したがって反対符号の同じ長さの弦である。したがって最明色 $a \rightarrow b$ には二つの補色の最明色、 $b \rightarrow a$ と $c \rightarrow d$ がある。補色のスペクトル色、すなわち無限に狭いスペクトル切片の最明色は、反対方向の平行な接線を有する。

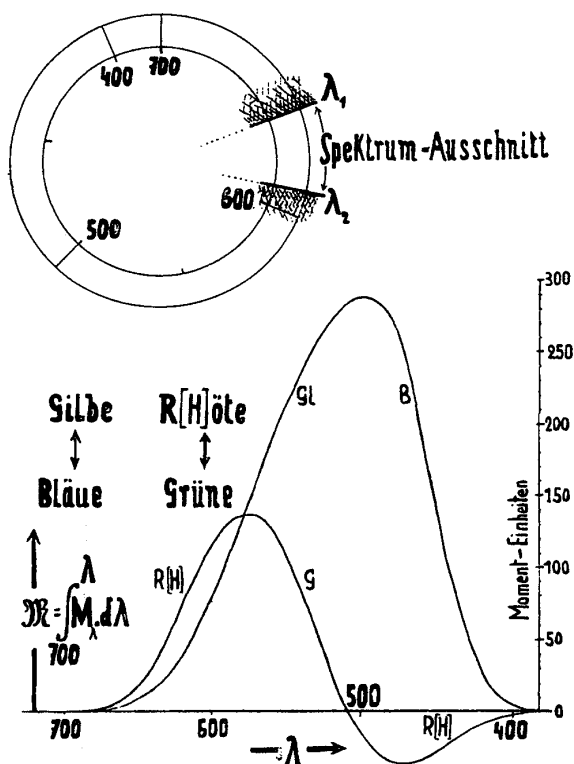


図8 非減衰連続スペクトル切片の混合刺激としての最明色。最明色の二つの原モメントを求めるための二つの原モメント積分 M のスペクトル原曲線。

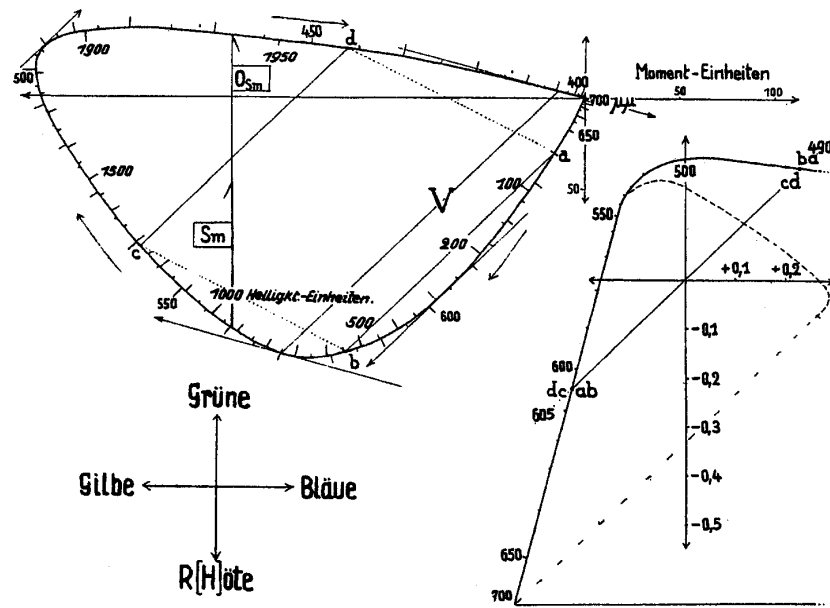


図9 波長と明度単位で二重目盛を付されたモメント加算曲線および色図との関係。平行な弦ベクトルは同じ色調の最明色に対応する。そのスペクトル切片は弦の始点と終点の間の曲線の時計回りにあり、その二重目盛から波長領域と明度がわかる。弦の長さは色モメントに等しく、スペクトル色刺激成分に比例する。オストワルトの完全色は色モメントとスペクトル刺激成分が最大で、曲線を補色波長で、すなわち反対方向の平行な接線の接点で切るか、でなければ屈折点(曲線の終始点)で切った場合である。二つの補色の偽灰色フィルター(立体視用)と、最明色の明度を落とした色刺激としてのエメラルド(Sm)も示す。

12. こうしてみると、一つの弦を平行移動することによって、同じ色調(イソクローム)で切片幅を広げるときの両側波長が容易にわかる。このとき弦長、すなわち彩度または色モメントは、ゼロ(無限に狭い切片)から最大のVを経て、再びゼロ(総合スペクトル)になる。最大の弦長または彩度はオストワルトの完全色に当たる。というのはそのとき曲線は、平行な接線を有する二つの補色点か、または角(かど)で切られるからである(図参照)。

弦長(色モメントまたは彩度)の意味はつぎのように考えると直観的になる。最明色の明度をニュートンの意味でその「重さ」とすると、最明色の各特性値についてつぎの関係が得られる。

モメント＝梃子長×重さ

梃子長＝スペクトル色の梃子長×飽和度

スペクトル成分の重さ＝重さ×飽和度

したがって

モメント＝スペクトル色の梃子長×スペクトル成分の重さ

このように弦長(最明色のモメント)は最明色刺激が含むスペクトル刺激量に比例する。比例係数(スペクトル色の梃子長)は当然、色調と単位に依存するが、特定の色調、すなわち並行的な同一方向の弦にはコンスタントである。

かくして古典的測色学においてオストワルトの完全色は、完全な色素が含むことのできる最大限のスペクトル刺激を含むもので、その意味で古典的色彩論の「ハイライト」である。

13. 図9のスペクトル・モメント加算曲線(図10、13も参照)にはいくつかの弦が記入されているが、これはこの曲線の実際問題解決の応用例である。二つの補色的な切片領域abとcdを有する色素は、いわゆる擬似灰色である。同じことは切断領域bcとdaの色材にもあてはまり、それは同様に擬似灰色で、前者に対する補色でもある。この種の補色の擬似灰色によってできるアナグリフに見る光景はおもしろい。すなわち灰色のもつれた線が、この灰色フィルター眼鏡を通してみると立体的に解きほぐされる。この種のアナグリフのデモンストレーションにはキャリア²⁶⁾があるが、黄色い斑点の内視現象のような妨害もあった。その他、当然その色は光のスペクトル組成に強く依存し、色調や眼の個人的特性にも依存する。すべてこれらの特性は測定目的に応用される。

モメント加算曲線についてはいろいろ言うべきことがあるが、ここではそこに成り立つ関係から三つの空間構造を描くことに限定したい。これはなにより色素の色の特性の説明に適している。

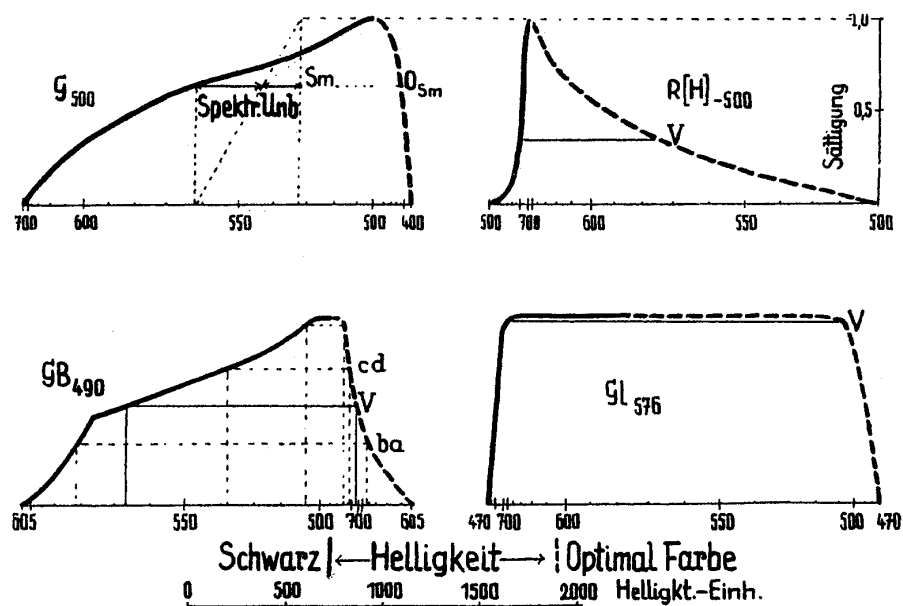


図10 色素の色の解析に有効とみられる一つの空間構造の四つの断面。色調、飽和度、明度の座標を有する。横軸は等輝度スペクトル分割、左の斜面は明度ゼロ、右の破線斜面は最明色。エメラルドSm是最明色 O_{Sm} を暗くした点にある。エメラルド刺激のスペクトル刺激量がグラフ上で求められる。スペクトル刺激最大の最明色(GB₄₉₀の断面参照)、黄(Gl₅₇₆)の最明色の特異性が見られる。

14. 図10は色調、飽和度、明度の三つの直角座標からなる一つの色立体の、四つの色調断面である。各断面は色調が一定で、飽和度と明度が変わる。飽和度は縦座標、明度は横座標である。曲線の左の斜面は明度ゼロで、左斜面から右へ明度が増す。右の斜面は最明色で、その明度は左の(黒の)斜面からの水平距離で、その飽和度は縦座標で表される。

最明色の二つの境界波長も同様に読み取ることができる。すなわち一つの水平線(一定飽和度)と左右の斜面との交点を横軸に垂直投射し、その点の波長を読みとる(GB₄₉₀の曲線参照)。この目的のために横軸基線の波長目盛は等輝度スペクトルになっている(脚注23参照)。当然、横軸目盛の始点は断面の色調によって変わる。

最明色のスペクトル成分の明度は最明色の明度に飽和度を掛けたものだから、たとえばGB₄₉₀の曲線に記入されたような長方形の面積で示される。非常に狭いスペクトル切片ではこの面積は小さく、飽和度が下がり、切片幅が広がって明度が上がると面積は大きくなる。それはオストワルトの完全色で最大となり、幅がさらに広がると再び小さくなり、最後にスペクトル全体(飽和度=0)の切断になると、ゼロになる。

最明色でない色刺激(たとえばエメラルドSm)は、当該の最明色刺激を暗くしたものであるから、その最明色(O_{Sm})に対応した水平線上、左斜面方向に偏った

点にある(G_{500} の曲線参照)。水平線は一定の色調と飽和度の、換言すれば一定のクロマの線で、オストワルトのシャドウ系列に他ならない。エメラルド刺激の全体の明度がスペクトル成分と無彩色成分に、幾何学的に分離されている。

四つの曲線の形の違いから、それぞれの色調における明度と飽和度の変化の違いがわかる。とくに黄色の色素は特殊で、全体スペクトルの85%以上の明度の完全色がほとんど(98%)飽和している。それに対して例えば赤^(H)の完全色は暗く、飽和度も低い。また切片波長の一方がスペクトル端を横切るとき、反対側の斜面に不連続的な屈曲が現れることがわかる(GB₄₉₀の曲線)。

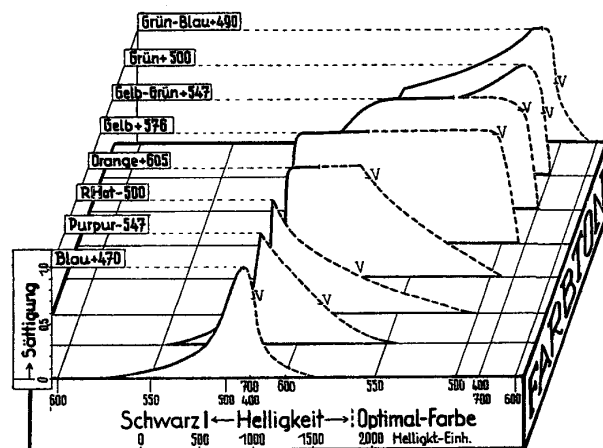


図11 図10で述べた立体の平行遠近法的表示。

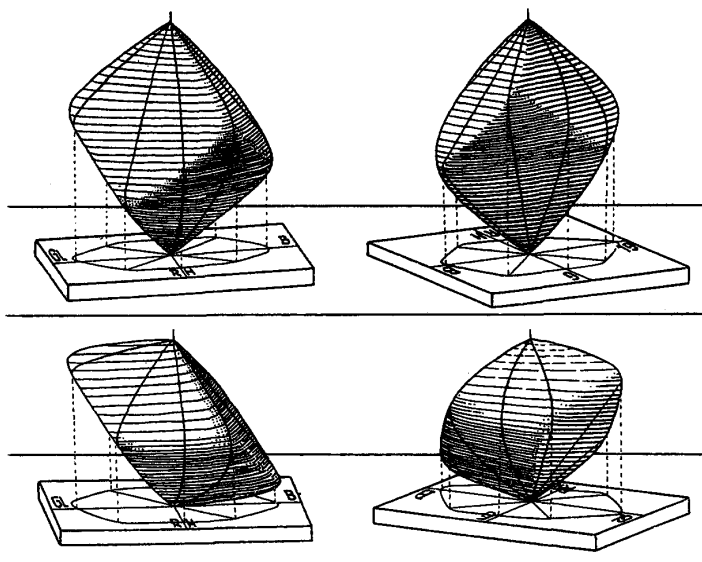


図12 平行六面体型色素色刺激立体の遠近法的表示。青-黄、緑-赤^(H)の水平直角座標と刺激量(上図)または明度(下図)の垂直座標を有する。下側の立体の角度差45度ずつの経線は図13の断面に対応する。オストワルトの完全色は立体に接する垂直のマントルを通して水平座標面に投射される。

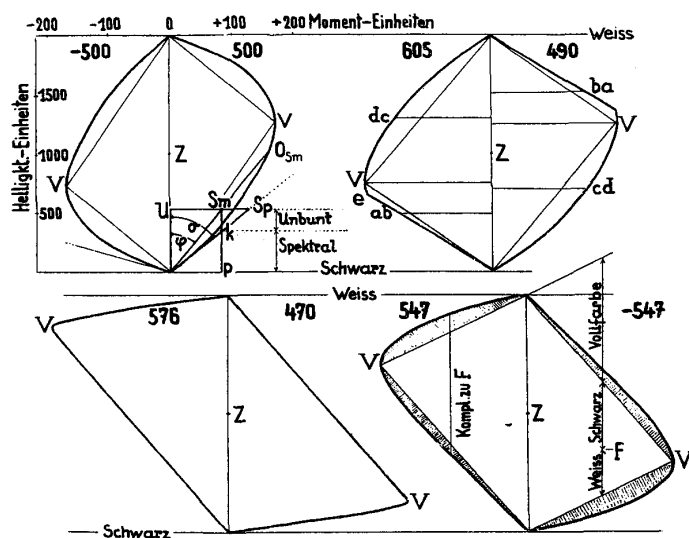


図13 明度単位の色色素刺激立体(図12下)の四つの等間隔経線の軸断面。共通の黒-白軸と二重対称中心Zを有する。断面の色調は：緑₅₀₀-赤^(H)-500(上左)、橙₆₀₅-緑青₄₉₀(上右)、黄₅₇₆-青₄₇₀(下左)、黄緑₅₄₇-

紫_藍-547。エメラルド刺激の飽和度 $\frac{U - S_m}{U - S_p} = \frac{p - k}{p - S_m}$ 、

全体の明度 $p - S_m$ に含まれるスペクトル刺激 $p - k$ 、最明色 O_{S_m} を暗くしたものであるエメラルド刺激 S_m (上左)：図9に弦で表された最明色の再現(上右)：オストワルト三角形(白・黒・完全色から二つと色調)と欠落した色(シャドウ部分)、刺激Fに補色の刺激の全体(下右)：黄色の色素の特殊性(下左)などが示されている。

図11は色調断面の系列を立体的に示す。それは連結した二つの等輝度スペクトルの上に配列されている。

15. 青-黄、緑-赤^(H)および刺激和または明度の直角座標系を有する色素色刺激立体の一例が図12、13、14である。図12上と図14は刺激単位、図12下と図13は明度単位である。立体の形は平行六面体で、丸みを帯びた角と稜線と凸面があり、二重対称中心を有する。

座標値のゼロ点は無彩色の黒、色モメントがゼロの無彩軸は黒、灰、白の縦軸である。無彩軸以外の立体内の各点には有彩色刺激がある。その明度(または刺激和)は垂直座標に、色調は二つの水平座標の比率に、色モメントは二つの水平座標の合成に読み取れる。立体表面には所与の色調と明度(または刺激和)で最高彩度の色、つまり最明色があり、その他の色素色刺激の点はすべて内部にある。

二つの刺激の加法混色は、それぞれの青-黄モメント、緑-赤^(H)モメント、明度または刺激和の加算である。言い換えれば座標の原点から二点に引かれたベクトルは、平行四辺形則にしたがってベクトル加算される。色刺激はグラスマン・マクスウェルのベクトル表示という意味でベクトルと解釈される(前掲Pilgrim参照)。二つの刺激の分割混合(たとえば混色円板)では、混色刺激は二つの点を結ぶ直線上の逆比分割点にある。

16. 縦軸を含む断面は補色関係の二つの色調の色素色刺激の総体である。図13はそのような四つの立体断面(明度単位)を示した。各断面の白黒軸の中間点Zは二重対称中心である。加算して完全スペクトルとなる二つの最明色は、互いに等しいが反対方向の色モメントを有し、中心点に対して対称的位置にある。

座標値のゼロ点(黒色点)は無限に狭いスペクトル切片と見ることができる。切片幅を広げると色モメントと明度がともに増加する(図13、 $\lambda = 605$ と $\lambda = 490$ の断面を参照)。色モメントはオストワルトの完全色で最大になり、その後は減少して、切片幅がスペクトル全体になると再びゼロ(白色点)になる。曲線の各点にはスペクトル切片の二つの波長を与えることができる。断面は互いに補色関係であるから、一方の波長値を示せば足りる。等波長線は立体の表面を極と極の間に不規則な螺旋を描くが、波長値ともに図には示されていない。

四色系の色素色刺激立体と単色系あるいは三色系と

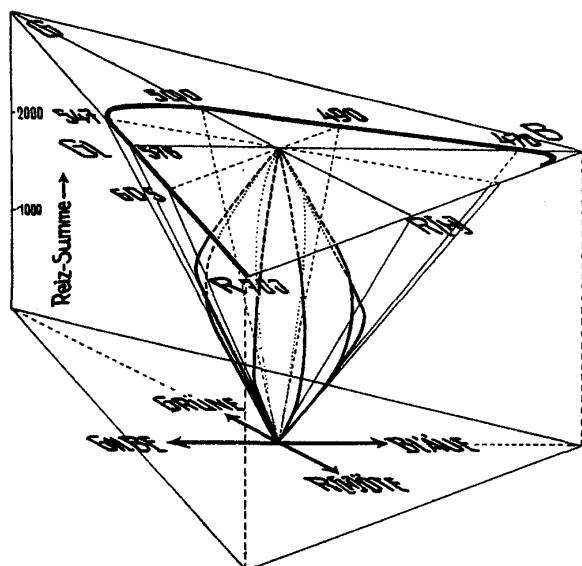


図14 色素色刺激立体と色図およびマクスウェル色円錐との関係 (いずれも刺激単位)。

の関係は12節の式から導かれる。たとえば $\lambda = 500$ と $\lambda = -500$ の緑-赤^(H)断面のエメラルド Sm については、

色図上の梃子長=モメント/重さ

$$= \frac{U - Sm}{p - Sm} = q \operatorname{tg} \phi$$

である。無限に狭い切片による飽和したスペクトル色については、梃子長 $=q \operatorname{tg} \sigma$ である。角 σ は黒色点における接線と無彩軸との角、係数 q は任意の単位に依存し、この場合は0.2である。飽和度は

$$\frac{\operatorname{tg} \phi}{\operatorname{tg} \sigma} = \frac{U - Sm}{U - Sp} = \frac{p - k}{p - Sm}$$

となる。これより刺激 Sm の明度 $p - Sm$ はスペクトル成分の明度 $p - k$ と無彩色成分の明度 $k - Sm$ との和ということになる。

色図との関係もまた上の式から与えられ、図14に刺激単位の立体として遠近法的に示されている。黒色点からスペクトル曲線(純紫線を含む)に向けて拡がる放射線は黒色点で色素立体に接し、マクスウェル型スペクトル円錐のマンテルをなす。その中にすべての実在色刺激がある。その中で色素立体は色素色刺激の境界を切り取っている。

17. 立体内の点の位置は、このようにいろいろな形式のトリアードで与えられるが、近年、普及していきとくに注目されるのが、オストワルト・トリアードである。これは黒、白、完全色のいずれか二つと色調を

もって規定3変数とする。実際、白色点、黒色点、完全色の造る三角形上の点を、二つの分量から一義的に決めることができる。しかも図13の $\lambda = -547$ の断面上、刺激 F に見るように簡単である(5節参照)。しかしこの断面の影のついた部分から明らかなように、色素色にはオストワルト系のプラス変数では表せない色がある。黄-青断面(576、470)では曲線とオストワルト三角形はほとんど重なるが、暗い赤と明るい青緑(500、-500)の最明色では、この食い違いは大きい。エメラルドは黒成分が0.57、完全色成分が0.47で、-0.04の負の白色成分がある。

そういう問題はあるにしても、オストワルト系から古典的色彩論のトリアード・システムへの簡単な変換手続きがあるということは、重要に思われる。

18. 図13にはさらに注目すべきことがある。橙色断面605の刺激 ab は、スペクトル切片による一つの最明色であるとともに、点 ab と e との間の任意の最明色の明度低下によっても得られる。最明色のこのメタメリーは色図上のスペクトル曲線の直線部分、すなわち $\lambda = 700 \mu\mu$ と $\lambda = 545$ の間でのみ起こる。Eのような角は切片波長的一方がスペクトル端を越したときに生じる。

黄緑 $\lambda = 547$ の断面には刺激 F の補色刺激が垂直線で示されている。

黄の完全色($\lambda = 575.5 \mu\mu$ 辺り)には、とくに高い飽和度(約0.99)と明度(総合スペクトルの約0.9)がある。

色素色刺激立体についてはもっといろいろなことがある。たとえばオストワルトの二重円錐、ルンゲの色球体、ヘリンク、エビングハウス、ヘフラーの心理的配列との関係などであるが、問題があまりに広範である²⁷⁾。

19. そこで終わりに色素色刺激立体におけると同じ座標に、色素色刺激の全体を空間的に配列することについてもう一つだけ、簡単に述べる。

モメント加算曲線(図9)の波長 λ の点の直上に、 $\lambda = 700 \mu\mu$ から λ までのスペクトル切片の明度を、曲線平面から垂直に立ち上げるとする。そうするとその端点の一つの空間的螺旋を描く。そのような二つの螺旋を考える(図15を参照)。

螺旋の内側にある二つの点を結ぶ直線としてのすべての上向きの弦の集合は、すべての最明色の集合であ

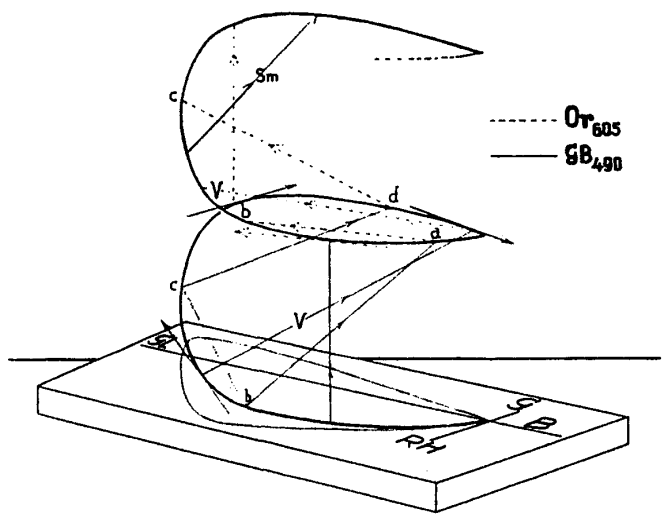


図15 最明色螺旋の遠近法的表示。色刺激は青-黄、緑-赤^(H)、明度の成分のベクトルで表される。記入された線と符号は図9、10、13に対応する。図9は図15の空間構造の垂直平行投射である。

る。最明色でない刺激はそれを短縮したもので、当該の最明色刺激の明度を落としたものであるから、その弦の部分として表される。

言い換えれば、色素色刺激には一定のベクトルが対応する。その三つの直交成分は明度(垂直方向)と二つの原モメント(水平方向)で、互いに独立な変数である。これより色立体におけると同様に、いくつかの定義的成分が得られる。すなわち色調、色図上の艇子長、飽和度、スペクトル成分の明度などで、色表示用のこの最明色螺旋のベクトルは、同じ尺度を仮定すれば、図12(下)と図13の色刺激立体の黒色点から発するベクトル(15節)と同じで、それが違った形で空間的に配列されたに過ぎない。それらは同じ色特性あるいは刺激質(同じ色調と同じ飽和度)であり、オストワルトのシャドウ系列に対応し、図10では水平線になる。

図15には図9、図10(左)、図13(上)と同じ刺激が、同じ記号で記入されている。弦、部分弦、接線などが記入されたモメント加算曲線(図9)は、最明色螺旋(図15)の垂直平行投射である。

以上で色刺激の空間構造についての短編を終わり、第2部では測色技術と色刺激論の応用について述べる。(訳註：訳者まえがきに述べたように、第2部は中略。)

まとめ

色刺激の特性を等しく完全に記述する各種のパラメーター・トリアドがある。

古典的三原刺激トリアドについては、等量の赤、

緑、青に調整されたスペクトルを使用して、混合刺激のスペクトル曲線から、その三つの原刺激量を求める簡便法を示した。

色刺激和に関するニュートンの重心論から色モメントという一つの量を導いた。それによってピルグリム・シュレチンガーの言う色刺激の三色系と四色系の関係がわかる。

スペクトル・モメント加算曲線により、色調を一定に保ちながらスペクトル切片幅を拡大するときの二つの切片波長をグラフ的に容易に求めることができる。

オストワルトの完全色は古典的色刺激論におけるハイライトで、それは一定の色調の色素色の中で最大のスペクトル刺激量を含むものである。

とくに色素色刺激にとって重要な三つの三次元色立体が構成される。すなわち a) グラスマン-ヘルムホルツ型の立体(色調、飽和度、明度の三座標)、加えて最明色のスペクトル切片波長を読み取ることができる； b) 最明色螺旋(青-黄、緑-赤^(H)、明度の三座標)、同じく最明色のスペクトル切片波長の読み取りができる； c) ヘリンク-マクスウェル型の色素色刺激立体(座標は同じ)。

最後の立体はオストワルト型パラメーター・トリアドと古典的色刺激論との関係、およびオストワルト系にない色素色刺激を一目で示す。(訳註：以下第2部関連のまとめは省略)

脚注：

- 1) *Ann. d. Physik*, 63 (1920).
- 2) なか かん づ く E. Schrödinger in Müller-Pouillet's *Lehrbuch der Physik* (1926).
- 3) *Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane*, Ergänzungsbd. VII.
- 4) 本論の第1部の3節から19節は、体裁はともかくほぼ同じ内容で、1923年9月の *Zeitschr. f. Angew. Chem.* のオストワルト記念号に出る予定であったが、図が多い上にインフレによる費用の高騰で印刷できず、結局、*Spektrum und Farbe*と題する論文だけが出た。 *Zeitschr. f. Angew. Chem.* 36 (1923) 参考。
- 5) この曲線はケーニッヒ-ディーテリッチ、フォン・クリース、マクスウェル、アブニー、エクスナー、アンギエル-トレンデレンブルク、その他による測定を筆者が任意に変換して総合した。数値は別に公表されている。これはその後のアイヴズ

(Frankl. Inst. 1915 u. 1923) の原刺激に変換してもよく一致した。筆者のとった原刺激は特徴的であったが、それについては第7節末に述べる。バルツ氏とヴェント氏には図やモデルの作成に協力を得たことを感謝する。

- 6) *Wien. Akad. Ber.* III (1902).
- 7) 面積は同質量の矩形紙の面積で求めるのが簡単。
- 8) 色調を表す波長と反射率最大の波長とが一致する必要はない。
- 9) 英米の文献ではこのトリアドを単色系という。明度単位の飽和度は純度と言われることが多い。
- 10) 色調と飽和度、もしくは原刺激の二つの成分(量あるいは強度を与えることなく)によって色刺激の刺激質(フォン・クリース)、色特性あるいはクロマが定義される。
- 11) *Philos. Mag.* 24 (1912).
- 12) 視力法だけが全く偏った結果になった(眼の着色のため。眼鏡着用者にとっては眼鏡の着色も加わる)。
- 13) とくにCl. Schäfer, *Physikal. Zeitschr.* 26 (1925) 参照。
- 14) 明度単位の色図を実験に利用したのは、筆者の知るところでは、A. Mitscherling, *Wundts Psychol. Studien*, I Heft 2 (1905) と Angier u. Trendelenburg, *Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg.* 39 (1905) 以来である。
- 15) この曲線は他の文脈においてだが、最初にL. Pilgrim: *Einige Aufgaben der Wellen-und Farbenlehre des Lichtes* (Beilage zum Programm der Realanstalt Cannstadt 1901; Lehmann-Frick II, 2 S. 17-93, 1901 も参照) において、スペクトル色線と称された。
- 16) 図5の色図のそれぞれ波長値のついた三つの曲線の二つは、対応する下の曲線図の四つの曲線のうちの三つとともに、古典的色彩論の内容を完全かつ正確に表す。
- 17) 右の色図の途切れた部分は左の色図の対応する部分の斜め中心投射である。
- 18) H. Ives, *Frankl. Inst.* 1915. それにもかかわらず明度単位のスペクトル曲線はつねに有限値で残り、R-G-線の右側にある。実験的に測定されるスペクトル明度曲線は恣意的な三原刺激と当然無関係だからである。
- 19) E. Schrödinger, *Wien. Akad. Ber.* 134 (1925)

参照。実際の計算にとって都合のよいことに、係数 γ と ρ はほとんど等しく、刺激量から明度への変換が簡単である。 $\gamma = \rho = 1$ とすれば、任意の刺激の明度は赤刺激と緑刺激の和に等しい。すなわち筆者の原刺激トリアドにとって、スペクトル全体の明度は2000 (明度単位) となる。

- 20) 8節と9節に関する類似の、しかし別のやり方として Pilgrim (前掲) と Schrödinger, *Wien. Akad. Ber.* 134 (1925) を参照。さらに脚注 (4) 参照。
- 21) これを四色系ということがある。
- 22) 係数 m 、 n 、 p は座標軸、色図、単位のとり方に依存する。軸が無色点を通るならば、 $m+n+p=0$ となる。筆者の場合、

$$M_{\text{Blau-Gelb}} = \frac{1}{3} B - \frac{1}{3} R; \quad M_{\text{Grün-Rot}} = \frac{2}{3} G - \frac{2}{3} R;$$

$$S = R + G + B; \quad H = R + G$$

- 23) ここでもまた例の方法(4節参照)が応用できる。すなわち明度でも刺激量でもモメントでも同じことだが、横軸の等増分が、例えば明度の等増分に対応するように横軸のスペクトル目盛を調整する。これによってできる等しい明度の昼光スペクトルを、等輝度スペクトルと呼ぶ。筆者の知るところでは、これはA. Fick, *Pflügers Arch.* 64 (1896) で使われた。
- 24) E. Schrödinger, *Ann. d. Physik* 62 (1920). W. Ostwald, *Physikal. Zeitschr.* 17 (1916). そのような色素の光感度についてはR. Luther *Zeitschr. f. Elektrochem.* 14 (1908).
- 25) このパラメーター・トリアドを筆者は Prof. Dr. E. Goldberg から知ったが、これに関する彼の論説シリーズ(*Zeitschr. f. Reproduktionstechnik* 1914) は戦争で中断された。後にフォン・クリースが、本誌 *Zeitschr.* 5 (1924) で、このトリアドを推奨している。
- 26) *Photographic Journal* 37 (1913). 筆者とのたまたま以前の会話に触発されたもの。当時(1906)、筆者はスペクトル・モメント加算曲線に気づいていなかった。
- 27) マンセル色空間と外見は似ている。マンセル系について筆者は文献でしか知らないが、色調、明度、飽和度の三つのパラメーターがあるそうだから、その軸断面は図10と簡単な関係がつくに違いない。