色彩に関する心理的実験

—その必要性と問題点—

慶応義塾大学文学部

印 東 太 郎

1. ま え が き

「色彩心理と測色」も11回目となるといささか種がつかせてくる。主要な問題は前回までの連載ですでにつくされているので、今回は全体のしめくりとして、色彩における心理的実験の必要と、その実施上の問題点について若干述べることにする。

2. 心理学的実験の必要

“表色系” (第2回) において詳述されているように、測色というものは放射エネルギーの単なる純物理的計測ではなく、可視放射エネルギーの正常者に色および色彩の知覚をひき起こす分光組成の特性の表現ということになっている。たとえば CIE の三刺激値 X, Y, Z によって色を表わすには、人間の視覚系との関連によってきまる $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ と、放射エネルギーの特性である分光組成 $P(\lambda)$ や物体の分光反射 (透過) 率 $\rho(\lambda)$ との双方が必要とされ、標準状態の下では (X, Y, Z) と、それが表わす色彩との間には1対1の対応がつくように定義されている。すなわち、測色の基礎には人間の視覚系の特性の計測があり、ここに心理学的実験の必要とされるひとつの理由がある。

このように、測色それ自身が、放射エネルギーの物理的計測を通し、正常者の知覚する色彩を表わすように定義されている以上、たとえばカラーテレビ受信機に現われる色彩は、そのブラウン管上の測色によって、完全に規定され、表わされるはずと思われるかも知れない。たしかに、ある画像のある位置Qにおける放射エネルギーの分光組成 $P(\lambda)$ を計測すれば、 $(X, Y, Z)_Q$ の値はきまり、必要であれば、その値からまたマンセル表色系の表現 $(H, V, C)_Q$ の値も求められる。

しかし、この $(X, Y, Z)_Q$ あるいは $(H, V, C)_Q$ によっ

て、人間がその画像のその位置Qに知覚する色彩が表わされるかといえば、それは必ずしもそうはならないのである。まず、“色対比と Color Appearance” (第6回) において詳述されているように、その点の周囲の状態によって、Qがどういう色彩に見えるかは大きく影響される可能性がある。

位置Qの周囲を灰色でカバーして、Qだけしか見えないようにすれば、 $(X, Y, Z)_Q$ によって、そのときに見える色は規定されるが、周囲が見えているときにはQはその色に見えているとは限らない。したがって、マンセル表色系において $(H, V, C)_Q$ に対応する色票の色と画像の中の位置Qに見えている色とは、相当に違い違っている場合が少なくない。

だいたい、CIE表色系にしてもマンセル表色系にしても、その中に金や銀という色はないが、カラーテレビ受信機のうではりっぱに金や銀が再現される。この場合も、その点だけしか見えないようにすれば、金は黄赤に、銀は無彩色に近い色になってしまう。

また、カラーにせよ、白黒にせよ、測色からいえば、ブラウン管の上にはスイッチを入れないときのブラウン管の表面より暗い色は作れない。したがって、ブラウン管の表面がグレイに見えるとすれば、画像の中に黒は見えないはずなのであるが、実際には、鮮やかな黒が見える。ただし、そのためには周囲に白があることが必要なので、黒に見えていた部分も、その点だけしか見えないようにするか、あるいは周囲に白がないときには、スイッチを入れる前のブラウン管の色にもどってしまうのである。

上述のように、ブラウン管上の画像の各位置の測色結果が、ただちにそこに人間が知覚する色を与えてくれるとは限らない。しかも、色彩の知覚に個人差の存在はまぬがれず、同じ分光組成の対 $P_1(\lambda), P_2(\lambda)$ を与えても、人によって両者は同じに見えるという人も、見えないという人もありうる。

測色・表色系としては周囲の条件、観察者の個人差な

“Psychophysical Experimentation on Color—Its Necessity and Problems—” by Tarow Indow (Faculty of Literature, Keio Gijuku University, Tokyo)

どをいちいち考慮に入れていたのではシステムとして成立し得ないであろう。どうしても、標準条件の下における標準観察者という概念を導入しないわけにはゆかない。そして、標準条件としては周囲に色のない視角 2° (または 10°) 程度の内部においても均質な部位を想定しているのである。

ブラウン管上の位置 Q における測色結果 $(X, Y, Z)_Q$ は標準条件の下であれば、標準観察者にはしかじかの色 $(H, V, C)_Q$ に見えるべき物理的状态に点 Q があるということを指示するのに止まる。したがって、画像の中でその位置 Q に実際に見えている色を知るためには、その色をマンセル表色系の色票と直接に比較するなど、別個の心理学的計測が必要で、ここにも心理学的実験が必要とされるひとつの理由がある。

“色差と UCS 表色系” (第3回) には、現在までに提唱された明度関数が8種、および、NBS や CIE 1964 の式など、いろいろな色差式が詳述されている。いろいろあるというのは、決定版がないということにはかならない。明度関数の場合、黒から白の間を人間の感覚にとって等間隔なステップで区切った均等明度スケールをいかに定義すべきかということにひとつの問題があり、色差式の場合には、人間が2色の間に知覚する色差の大きさを正しく表わす方法が先に存在しなければ、色差式の評価を行なうことはできない。これらはいずれも感覚尺度の構成 (scaling) と呼ばれる問題で、ここにも心理学的実験が必要とされるのである。

3. 判断の信ぴょう性と個人差

心理学的実験を行なう以上、そのどこかのステップで人間の判断を含めないわけにはゆかない。こういう場合、人間判断の導入とその統制、その結果の処理などについては、純然たる物理的計測のみに慣れておられる方々には、普段とは少しく手心の異なる面があるであろう。人間の判断を扱う手心について、筆者はすでに本誌において若干述べたことがある¹⁾。なるべく重複をさけながら、再び同じ問題を取り上げることとする。

色彩に関する心理学的実験において主として用いられてきた判断は、大別すると、次の4つの型にわけて考えることができるであろう。

1. 同一 (identity) の設定、すなわち、完全等色 (full or complete color matching)
2. 同等 (equivalence) の設定、すなわち、主観的等価点 (point of subjective equality) の測定
3. 相違の存在の検出、すなわち、閾値 (threshold) の測定
4. 閾以上の相違の大きさの評価 (evaluation)

以下、第2章に指摘した心理学的実験の必要とされる事例を中心に、それぞれの型の判断について述べる。なお、実験の試験台になっている人を被験者 (subject)、感覚を起こす物理的条件は、単波長光のようなもの、図形を含む画像のようなものも、すべてこれを刺激 (stimulus) と呼ぶ。

一般に、物理系や工学系の方々にとっては、人間の判断を取扱うのは気味の悪いことに違いない。それにはいろいろな理由があるであろうが、その主な理由は次の2点に帰せられるような気がする。

A. 判断には常に“どうとでもいえる”という不信心がつきまとう。極端な場合には人間は相違が見えないのに“見えた”というような嘘もいえるわけで、物理的測定器の指示する結果にくらべると、被験者が generate する判断には客観性と信ぴょう性が乏しい。

B. 被験者には個人差の存在をまぬがれない。これは物理的測定計器における器差に相当するが、器差であれば、原理的にはこれを較正する手段がありうるが、個人差のほうはそういうわけにはゆかない。

判断に少しでも客観性と信ぴょう性とを与えるためには、被験者が“いいかげん”に判断していたのでは成立し得ないような整合性が判断データの中に認められることを客観的に示すほかに、同時に、判断のもつ精度も客観的に明示しておく必要があろう。また、実験の条件などをいかに整備しても、個人差はこれをゼロにすることはできないのであるから、個人差のほうもそれがどの程度のものか、それを承知したうえでデータを利用する以外に方法はない。

4. 同一の設定——完全等色

“色覚の心理物理” (第1回)、“表色系” (第2回) に述べられているように、CIE 表色系は混色実験を基礎として構成されたもので、1931年に制定されたRGB表色系はWright²⁾³⁾とGuild⁴⁾の混色実験データによっている。

Wright は彼の名を冠して呼ばれている有名な三色色彩計を用い、上下に2個並んだ横 2° 、縦 1° の方形の下の方に、ある特定の単波長光 λ が、上の方には3種の原刺激 $R_w(650\text{ nm})$ 、 $G_w(530\text{ nm})$ 、 $B_w(460\text{ nm})$ が入り、被験者は両者がマッチするまで R_w 、 G_w 、 B_w の分量を調整した。この場合には上、下がすべての面で完全に同一に見えるようにするので、必要であれば下の単波長光 λ に原刺激のひとつを加えなければならず、このときには色度座標を負と定義することは周知のとおりである。

Wright の用いた10人の被験者の結果のすべてを示したのが図1で、たとえば、 $\lambda=550\text{ nm}$ の単波長光と R

図1 Wright が10人の被験者を用いて得た色度座標値 (Wright)

を約0.15, G を約0.9, B を約-0.05の割合で混色したものとは同一に見えるというふうに読むのである。この比率をきめるには原刺激 R_w, G_w, B_w をそれぞれある単位で表わすという約束が必要で, Guild では標準光源Bと等色する R, G, B の量がそれぞれ 1/3, 1/3, 1/3 となるよう原刺激の単位を定義している。Wright の場合には後に W. B. W 法として知られるようになった方法で原刺激の単位が約束されているので, 図1において, S_1 (582.5 nm), S_2 (494.0 nm) においては, この単位の約束から, すべての被験者の曲線, (R と G), (G と B) が必然的に一点で交わるようになっている。

図1を見ると, 10人の結果がよくそろっていることが認められる。これは, 多分, 心理学的実験によって求めている最も安定したデータの一例というべきであろう。この場合, 安定したデータが求められたのは, 上, 下の方形内の色がすべての側面で同一に見えるようにするという, 被験者に要求されている判断内容が単純明快であったことがひとつの理由になっているに違いない。

CIE ではこの Wright の混色データと Guild の混色データとをひとつに合成してRGB表色系の基礎とした。Guild は原刺激として R_G (630 nm), G_G (542 nm), B_G (460 nm) を用い7人の被験者について実験を行なったので, その結果は図2に示してある。ここでもまた, データはかなり安定していることが認められるであろう。現行の RGB 表色系では原刺激として R (700.0 nm), G (546.1 nm), B (435.8 nm) がとられており, Wright, Guild の実験が, もしこの原刺激を用いて行なわれていたとしたら得られたであろう結果を想定し, それを平均して“表色系”(第2回)の表1にあるスペクトルの色度座標が求められたのである。

上述のような想定結果を得るには一種の数学的変換が必要であるが, 色度座標の上に Wright (.....) と Guild (....) の変換結果を示したのが図3で, 両者は非常によく一致している。このように, 2つの別個の実験データの

図2 Guild が7人の被験者で行なって得た色度座標値 (Wright)

図3 Wright (.....) および Guild (....) のデータ, さらにその平均値(—)を表わした RGB 色度座標 (Le Grand)

中に, 適当な変換を加えれば, 両者がよく一致するという整合性が内在していたことは, この種の心理学的実験の客観性と信ぴょう性を示すものといえるであろう。事実, この種の実験はしばしば心理物理的 (psychophysical) と呼ばれるもので, 人間を含めるといっても, 判断としては2つの刺激が同一に見えるか否かという指示に過ぎず, 被験者は一種の null instrument としての役割しかもっていない。また, 当然, 色覚異常者は被験者として用いられていないので, その意味では, 個人差に関し, 一種の校正手段が存在するということができる。

Wright にしても, Guild にしても, 被験者は満足すべき等色が得られるまで一方の刺激を調整している。この調整には相当のコツを要するはずで, 2つの刺激がいまだ同じには見えない場合, 一方をどう変化させたらその相違が減少するか, そう簡単にはわからない。等色の場合には3つの変数を扱わなければならないだけに調整が困難なのである。したがって, 調整に要する時間をいかに統制するか, また, 完全に一致したという点をいかにして定めるか, 実験の実施に当っては, このような実験でも, 判断の扱いにはかなりめんどろな問題が多い。

この場合にも, もし, より厳重にこの点に統制を加え

ように思えば、いろいろな方法が考えうるもので、そういう判断の統制に関する諸手法を一般に心理物理的方法 (psychophysical methods)⁵⁾ という。Wright, Guild は調整法 (method of adjustment) によったものと思われるが、もし別の心理物理的方法を用いるとすれば、どうということが考えられるかについては 8.4 節に述べる。

5. 同等の設定——異色測光

CIE の XYZ 表色系は RGB 表色系から、適当な条件の下で、座標の変換によって定義されたものであるが、その場合の条件のひとつとして、変数 Y が明るさを示すと約束されており、そのために三刺激値のひとつ、 $\bar{y}_\lambda$ が各波長 λ の比視感度曲線 (luminosity curve) V_λ に一致するようになっている。

ところが、この V_λ を求めるには、特定の基礎刺激 (basic stimulus) を定め、各波長 λ の刺激の強度を加減し、それが基礎刺激と同じ明るさに見える点をきめなければならない。このときの放射束を P_λ とすれば、その波長 λ が人間の眼に明るさの感覚をひき起こす力が強いほど P_λ は小さいはずであるから、 P_λ の逆数を V_λ と定義し、単位の約束として、明所視 (photopic vision) において $1/P_\lambda$ が最大になる $\lambda=555\text{ nm}$ のところの値 V_{555} を 1 としてある。

基礎刺激としては、原理的には、ある輝度をもつ白色光をとるのが自然で、輝度が 1 fL 以上になると V_λ の値は基礎刺激の輝度レベルには依存しなくなると考えられており、これが明所視といわれる条件である。ある単波長光 λ と基礎刺激との間に一種の等色が行なわれるわけであるが、この等色は 4 章の完全等色ではない。すなわち、すべての面で完全に同一に見えるという点を求めるのではなく、色調その他の面では異なるが、明るさだけが等しいという、一側面についてのみの同等性の設定である。これは異色測光 (heterochromatic photometry) と呼ばれる。

異色測光をその定義どおりに行なうとすれば、視標の一方に基礎刺激を、他方に単波長光 λ を入れ、両者が明るさについて同等と認められるまで調整すればよい。これを直接比較法 (direct comparison method) という。Coblentz と Emerson はこの方法で 110 名について実験を行なったが、そのデータを標準比視感度曲線の基礎とするには不安定に過ぎるといわれている⁶⁾。同じ方法で Bedford と Wyszecki⁷⁾ が行なった実験結果を図 4 に示した。

視角 1° の円形の視標が上、下の半円にわかれ、上半円に単波長光 λ が、下半円に網膜照度 50 trolands の白色光 (色温度の記載なし) が入る場合のデータで、各被

図 4 比視感度曲線における個人差
(Bedford, Wyszecki, 1957)

験者は各波長 λ で 2～3 回明るさのマッチングを反復しており、図の実線は 4 名の被験者の平均、縦線はこれら 4 名の被験者の測定値の散布する範囲 (range) を表わしている。また、点でカバーされているのは、それまでに発表されているほぼ同等の条件で行なわれた他の 7 組の異色測光結果の散布する範囲である。

この 4 名の被験者は 3 種 (Hardy-Rand-Rittler pseudo-chromatic plates, Nagel anomalscope, Farnsworth-Munsell 100 hues) の色覚テストのすべてに合格した人々で、その意味で“校正を経た”人々なのであるが、この 4 名の被験者の間においても相当の個人差の存在することは事実であろう。ただし、この個人差の程度を図 1、図 2 の完全等色の場合における個人差の程度とただちに比較することはむずかしい。

たとえば、図 1 の場合には、定義からいって $S_1(582.5\text{ nm})$ 、 $S_2(494.0\text{ nm})$ においてすべての被験者の曲線が一点に交わる形になっていて、いわばデータの直流成分がそろえられているのに反し、図 4 にはそういう操作が入っていないので、交流成分的な波長の相違の間の相対的個人差に加え、直流成分的な個人差も加わっているからである。

この V_λ は wedge の位置を読取った値の逆数というだけのもので、もし各被験者において V_λ の最大値を一定の値にそろえられたとすれば、個人間の変動は図に見られるよりは多少は小さくなるはずであるが、しかし、図の縦軸が対数目盛りになっているので、この調整によってデータは垂直方向に一定量、上下するだけで、 V_λ の最大値の付近での個人差の小さいことを考えると、あまり大きな縮小は期待できない。

白色基礎刺激と各単波長光の明るさを直接に比較し、明るさに関する主観的等価値 (point of subjective equality, 以下、PSE と略記) をこの形で設定することは、被験者にとっては相当に困難な作業である。どのくらいのところで両者の明るさが等しいというべきか、その感じがシャープにきまらないからであろう。そこで、この

異色測光の精度を高めるために、いろいろな試みが行なわれた。

ひとつは small step あるいは cascade の形における明るさの直接比較で、まず λ_1 と λ_2 の明るさをマッチさせ、次に λ_2 と λ_3 の明るさをマッチさせるというふうに、基礎刺激を固定せず、それをスライドさせてゆく方法である。こうすれば、色調や彩度のあまり異ならない2色の間で明るさのマッチングを行なうので、明るさの PSE がよりシャープにきまるであろうという考えにたっている。CIE の標準比視感度曲線の基礎データのひとつに採用されている Gibson と Tyndall の実験⁸⁾はこの方法を用いている。

もうひとつの方法としては、基礎刺激の白色光と単波長光とを時間的に交互に眼に与え、“ちらつき”(flicker)の印象を起こしておき、一方の刺激の強度を変化してフリッカーの印象が最小になったところをもって明るさの PSE を定義する方法で、これをフリッカー法 (flicker method) という。これは2色の間のフリッカーには明度差も寄与しているはずであるから、一方の刺激の強度を変化してフリッカーが最小になったとすれば、それは明度差がなくなり、色度差のみになった点に相当するという考えにたっている。

直接比較によって白色光と単波長光との間で明るさがマッチしたという、あまり輪郭の明快でない判断に頼るよりも、フリッカーが最小になるという一点をおさえるほうが、被験者にとっても、また実験者にとっても、より信頼感を与えるようで、1937 年にドイツは標準比視感度曲線はフリッカー法によってのみ測定されるべきであるという提唱を行なったりしている⁹⁾。

それでは、フリッカー法と直接比較法とは、それぞれ個人差を平均して考えた場合、相互に整合性をもつ結果を与えるものであろうか、ということが問題になる。さらに進むと、複合波長光において $\bar{y}_\lambda = V_\lambda$ を用いて計算した刺激値 Y が、本当にその色の知覚上の明るさを表わすか、という問題にもなる。

Sperling¹⁰⁾ は視角 2° の視標を用い、直接比較法 (基礎刺激は 550 trolands の $\lambda=520$ nm の単波長光) とフリッカー法とにより、比視感度 $V_\lambda(d)$ 、 $V_\lambda(f)$ とを測定する一方、同じ 6 名の被験者について、R (650 nm)、G (520 nm)、B (460 nm) を原刺激とする各波長 λ に対する混色実験を行なった。これら混色実験の結果と、各原刺激に対する比視感度 $V_\lambda(d)$ あるいは $V_\lambda(f)$ を用いると、各波長に対する比視感度の値も理論的に導出でき、 $V_\lambda(d)$ を用いて導出したこの結果 (○印) と $V_\lambda(d)$ (実線) とを比較したのが図 5、 $V_\lambda(f)$ を用いて導出した結果 (○印) と $V_\lambda(f)$ (実線) とを比較したのが図 6

図 5 直接比較法による比視感度曲線 (Sperling, 1958)

図 6 フリッカー法による比視感度曲線 (Sperling, 1958)

である。

フリッカー法によると、明るさの測定と混色実験の結果との間に整合性が認められるのに反し、直接比較法によったのではそうはゆかないことは図から明らかであろう。また、直接比較法による $V_\lambda(d)$ とフリッカー法による $V_\lambda(f)$ 、すなわち、図 5 と図 6 の実線を比較すれば、両比視感度の間にも 550~660 nm のあたりでかなりの不一致が認められる。

実は同じ直接比較法であっても、固定した基礎刺激を用いた場合と、5.3 節に述べた cascade の場合とでは、同じ被験者についても、結果は同じにならないという意見もあり¹¹⁾、異色測光においては同等を設定する実験上の操作についても、また、各方法による結果間の整合性についても、なお問題が残されているといわざるを得ない。その根本の原因は、多分、色調その他の面では異なりながら、明るさという面においてのみ一致しているという判断が、完全一致という前節の判断にくらべ、人間にとって困難を伴うのと、そういう判断を generate している人間内部の software についてのわれわれの知識がまだ充分でないので、各方法による結果の中に、それぞれどのようなバイアスがあるのかわからず、したがって、各結果を理論的に補正して整合性を考えるという段階に至っていないからであろう。

6. 相違の存在の検出——色度の偏差長円

“色差と UCS 表色系” (第3回) に述べられているように、色度差の識別感度を表わすために、MacAdam は有名な偏差長円 (第3回, 図 11, p. 55) を構成した¹²⁾。そこにも述べられているように、この偏差長円を基本データとして、いろいろな UCS 表色系が提唱されてきたのである。ある標準刺激 (x_0, y_0, Y_0) に対し、明度を一定に保ちながら x 軸, y 軸に対してある方向 θ にそって色度を変化させた場合、色度図上においてその方向 θ にどれだけへだたったときに人間にその色の相違が識別できるか、その臨界値をその方向 θ における色度の弁別閾 (difference threshold) という。ただし、弁別閾は統計的に定義されるほかなく、通常は $\alpha\%$ の確率をもって識別のできる相違の大きさを弁別閾 $\Delta(\theta)$ とする。 α は 50% ないし 75% にとることが多い。

そこで、同じ標準刺激に対し方向 θ をいろいろに変化させて $\Delta(\theta)$ を測定し、 $\Delta(\theta)$ だけ (x_0, y_0, Y_0) からへだった点の軌跡を考えると、色度図上、この領域外の点によって表わされる刺激になって初めて $\alpha\%$ 以上の確率をもって区別ができるということになる。

ある方向 θ における弁別閾 $\Delta(\theta)$ を測定するには、いろいろな方法がありうる。たとえば、円形の視標の半分に標準刺激 (x_0, y_0, Y_0) を入れ、他の半分に入れた刺激の色度を方向 θ にそって連続的に変化しうような装置があるとすれば、標準刺激とは区別のできない (完全等色) とところから出発し、徐々に色度の相違を大きくしてゆき、初めて区別のついた点 $\delta_a(\theta)$ を定め (上昇系列)、あるいは、標準刺激からはっきりと区別のできるところから出発し、徐々に色度の相違を小さくしてゆき、初めて標準刺激と同一 (完全等色) に見えるようになった点 $\delta_d(\theta)$ を定め (下降系列) たとする。

こういう測定を各系列について n 回反復したとして、 $\delta_a(\theta)$ の平均値と $\delta_d(\theta)$ の平均値とが充分に一致したとすれば、それをもって弁別閾 $\Delta(\theta)$ とすることもできる。これを極限法 (method of limits) という。もし $\delta_a(\theta)$ も $\delta_d(\theta)$ もそれぞれの平均値の周りに対称に分布しているとすれば、 $\alpha=50\%$ という意味をもつ。事実、MacAdam は最初こういう方法で閾値 $\Delta(\theta)$ を決定しようとしたらしいのであるが、結果が不安定という理由で、この方法をやめている。

この場合、上昇、下降いずれの系列においても、完全等色の消滅、出現という輪郭の明快そうな判断に頼っているにもかかわらず、反復結果は安定しなかったらしい。

そこで MacAdam は上述の装置において、一方の刺激を被験者に調整させ、標準刺激とまったく同一に見え

る (完全等色) まで変化させ、そのときの色度点と標準刺激 (x_0, y_0, Y_0) との色度図上のへだたりを $\delta(\theta)$ とし、これを上昇および下降系列をあわせて $2n$ 回反復した。そして $\delta(\theta)$ は当然いろいろな値をとるが、その分布がほぼ正規分布に近いこと、その標準偏差 $s(\theta)$ がかなり安定していることを見出し、 $s(\theta)$ をもって弁別閾 $\Delta(\theta)$ と定義している。

この場合は、正規分布の性質からいって、 $\alpha=33\%$ にとったのに等しい。同一を設定するマッチングの変動の大きさによって $\Delta(\theta)$ が表わされているわけである。各 θ における $\Delta(\theta)$ をつなげると長円の形になるので、第3回の執筆者、福田がこれを偏差長円と呼んだのである。ただし、MacAdam は各方向 θ におけるマッチングの平均値が一点に帰するか否か、また、その点と標準刺激の (x_0, y_0, Y_0) とが充分に一致するか否かについては明瞭に記載していない。MacAdam においては $2n=50$ であった。

この場合、なぜこの方法のほうが結果が安定したか、それには次の2つの理由が考えられる。ひとつには、完全等色の消滅点、出現点をおさえるよりも、ただ完全等色の成立する点をおさえるほうが被験者にとって判断規準が安定するということも考えられる。もうひとつには、 $2n$ 回の反復にもとづいている場合、標準偏差の標本分布の分散 $V(s)$ と、平均値の標本分布の分散 $V(m)$ とは、それぞれ、

$$V(s) = \frac{\sigma^2}{4n} + O\left(\frac{1}{(2n)^2}\right)^*$$

$$V(m) = \frac{\sigma^2}{2n}$$

のはずで¹³⁾、 $\delta(\theta)$ や上述の $\delta_a(\theta)$ の分散がいずれも σ^2 であるとすれば、 $s(\theta)$ に対する $V(s)$ のほうが極限法の平均値に対する $V(m)$ より小さくて当然ともいえる。

MacAdam の 1942 年の実験においては、MacAdam 自身も、一部、被験者になっているが、偏差長円はただ一人の被験者 J. G. Nutting, Jr. のデータについてのみ定義されたものである。したがって、個人差はここでは問題にならないが、MacAdam 自身あるいは Brown¹⁴⁾ によって行なわれたその後の実験結果をみると、個人別に構成された長円どうしは必ずしも相互に一致はしていない。

たとえば、Brown¹⁵⁾ が 12 名の被験者について行なった同種の実験結果を図 7、図 8 に示した。ただしこの場合、被験者は色度に加え明度もまた調整するようになっており、視標の大きさも 2° ではなく 10° である。標準

* O はこの項が $\frac{1}{(2n)^2}$ と同じ order であることを示す Landau の記号

図 7 偏差長円の個人差 (Brown, 1957)

図 8 偏差長円の個人差 (Brown, 1957)

刺激は計 21 個であるが、12 名の被験者は同じ順番で 1 日に 1 標準刺激ずつ ($2n=60$) 実験している。図 7 は第一の標準刺激、すなわち、各被験者が第 1 日に行なった完全等色の散布を示す偏差長円、図 8 は第 17 日に行なった標準刺激に対する偏差長円を、それぞれ等しい明度の色度面の上に描いたものである。12 名の間に、長円の大きさについても、方向についても、相当の個人差があり、特に第 1 日目の場合のほうが著しい。12 個の長円を平均するに当たり、単純に平均すると、そこでひどく大きな長円を出した被験者の結果が不当に大きく平均値に影響を与えるおそれがある。

Brown はこの種の実験においては、ある被験者がたまたまある日だけ異常に大きな偏差長円を示すということがありうるとして、その比に相当するものをウェイトとして用いた荷重平均を採用している。その結果が図の右側に実線で示したひとつの偏差長円で、この標準刺激

に対し Nutting の偏差長円を描いたとしたらどうなるかを推定したものが図の点線の長円である。

MacAdam が 1942 年の実験において用いた標準刺激は 25 個であるから、それ以外の場所において Nutting の偏差長円がどういう形になるかは、この実験結果からはわからないが、適当な方法で内挿により任意の点に対する偏差長円を推定する方式¹⁶⁾が作られているので、それに従って計算したのである。推定に要する諸係数はずいぶん綿密に計算されているが、原理的にはこれはあくまでもこの標準刺激に対する Nutting の偏差長円を与えるに過ぎない点に留意する必要がある。

輝度も、視標の大きさも異なることを考えると、実線と点線の長円は本来そう完全に一致するはずはないのであるから、この結果からいうと、Nutting という被験者は色度の弁別閾に関する限り、なかなか平均人的データを出す人であつたらしい。ただ一人の被験者しか用い

いで、それがうまくこういう被験者であったとすれば、MacAdamにとっても、このデータを利用した多勢の研究者にとっても、まことに幸せなことであったといわなければならない。

7. 色差の評価

標準刺激 ϕ_0 に対する弁別閾 $\Delta(\phi_0)$ の場合、 ϕ_0 と刺激 $\phi = \{\phi_0 + \Delta(\phi_0)\}$ とは確率 α をもって識別されるという意味をもつ。ところが、 $|\phi_i - \phi_0| > \Delta(\phi_0)$ 、 $|\phi_j - \phi_0| > \Delta(\phi_0)$ で、それぞれ弁別閾以上の差をもち、いずれも確実に ($\alpha=100\%$) 色差 d_{0i} 、 d_{0j} が知覚される場合を考えると、今度はその知覚されている色差 d_{0i} 、 d_{0j} の間の大小関係、ひいては一般に知覚上の色差 d を表現する数値がはしくなるのは当然であろう。これが一般に色差式の問題で、“色差と UCS 表色系” (第3回) には数多くの色差式が紹介されている。

2.3 節において指摘したように、沢山の色差式があるということは決定版がないということにはほかならない。一般の色差式に対しては UCS 表色系が前提になっているが、特に変化の方向をある属性にそった一次元に限定すれば、明度や彩度や色調を表わす感覚尺度 ϕ が前提になる。

たとえば明度尺度の場合、 ϕ の上で同じ差 ($\phi_i - \phi_j$) = ($\phi_k - \phi_l$) をもつ2個の刺激、(ϕ_i, ϕ_j)、(ϕ_k, ϕ_l) はそれぞれ、人間には同じ明るさの差をもつものとして知覚されなければならない。ところが、明度尺度 $\phi = f(\phi)$ 自身、本講座第3回の図2に示されるように、沢山の形 f が考えられ、ひとつにはきまっていない。そのひとつの理由として、背景など周囲の条件によって f の形が変わるということもあるが、感覚尺度 ϕ をいかに定義するかということが解決されていないところに、より重大な問題がある。

感覚尺度 ϕ を定義するには、次の3種の規準が考えられる。

1. 弁別閾 Δ に立脚した尺度 ϕ_Δ 。どの刺激 ϕ に対しても弁別閾 $\Delta(\phi)$ が与えられているものとすれば、常に $\phi\{\phi + \Delta(\phi)\} = g(\alpha)$ となるように定義された感覚尺度を、以下、 ϕ_Δ と書く。 $g(\alpha)$ は α にのみ依存し、 ϕ に関しては独立な定数である。この尺度は、確率 α をもって定義された弁別閾 Δ に対応する飛躍が常に一定の歩幅 $g(\alpha)$ になる尺度で、本当は $0 < \alpha < 1$ の限り、いかなる α の値に対しても上述の条件が満たされるものでないと $\phi_\Delta = f(\phi)$ は一義的にきまらないことになる。有名な Weber の法則が成立し、

$$\frac{\Delta(\phi)}{\phi} = K(\alpha) \quad (1)$$

で、比 $K(\alpha)$ が α にのみ依存し、 ϕ には依存しない場合には、

$$\phi_\Delta(\phi) = A \log \phi + B \quad (2)$$

が成立し、この関数形は α に依存しない。(2)式は Fechner の法則として知られている。しかし、 ϕ の変化範囲の全域にわたって(1)式の Weber の法則が成立することはなく、したがって、(2)式も完全には成立しない。

2. 尺度上で ($\phi_i - \phi_j$) = ($\phi_k - \phi_l$) であれば、被験者は常に“刺激 (ϕ_i, ϕ_j) と (ϕ_k, ϕ_l) とは感覚上の相違について同等である”という判断を下すことが保証できるよう定義された感覚尺度を以下 ϕ_d と書く。A. E. O. Munsell, Sloan, Gadlove¹⁷⁾ がマンセル明度関数を構成したときには、主としてこの原理に則っている。

彼らの実験では一様な背景の中に垂直に9個のスリット (1.2 cm 平方) があけられてあり、下から上の方に1~9と名づけた。1と9のスリットにはそれぞれ黒 ($Y=3.14\%$) と白 ($Y=96.0\%$) の色紙が固定されているのに反し、2~8のスリットにはいろいろな明るさの色紙が提示されるようになっていた。被験者は黒から白まで感覚的に等しい歩幅で徐々に明るくなってゆくように見えるまで明るさを調整した。したがって、($\phi_2 - \phi_1$) = ($\phi_3 - \phi_2$) = ($\phi_4 - \phi_3$) = ... = ($\phi_9 - \phi_8$) という条件が成立したことになり、この場合、明るさの相違について同等が設定されているわけである。

そこで、縦軸に ϕ_1 から ϕ_9 まで等間隔の目盛りで表わし、横軸に Y_i の調整値 ($i=2\sim 8$) をとったのが図9である。被験者は14名で、横軸に平行な棒はその個人差を示す平均偏差、○印は平均値を表わし、実線の曲線は現在採用されている明度関数を示す。この他 Munsell らは実験的に ϕ_Δ を求めており、それは点線の曲線で示しておいた。原理的には ϕ_d が尺度構成の基準にとられた歩幅に依存しないことが証明されるまでは $\phi_d = f(\phi)$ が一義的にきまるか否かわからないはずで、Munsell らはそういう判断の整合性まではチェックしていない。しかし、この場合には ϕ_d と ϕ_Δ との間に充分な一致が示

図9 マンセル明度関数 (Munsell, Sloan, Godlove, 1933)

されているように思われるが、他の実験においては必ずしもそうはいかないことに注意する必要がある。

3. $\phi_i/\phi_j=r_{ij}$ であれば、被験者は常に刺激“ ϕ_i は ϕ_j の r_{ij} 倍に感じられる”という判断を下すことが保証できるよう定義された感覚尺度を以下 ψ_r と書く。色紙のような物体色でなく発光体の場合、 ϕ_i は ϕ_j の約2倍ぐらい明るいという比の印象は自然に成立するので、こういう比の判断を基礎に上述の条件を満たす尺度 ψ_r を構成することが考えられ、この場合、比の判断の整合性をチェックするのは比較的簡単である。

(ϕ_i, ϕ_j) に対し r_{ij}

(ϕ_j, ϕ_k) に対し r_{jk}

(ϕ_i, ϕ_k) に対し r_{ik}

という判断が与えられたとすれば、整合性の存在する以上、誤差範囲内で、

$$r_{ik}=r_{ij}r_{jk}$$

でなければならないからである。

上述のように、感覚尺度はいろいろな規準に則ったものが考えられ、 ϕ_d, ϕ_a, ψ_r それぞれにおいて判断の整合性をチェックすることが可能であり、多くの場合、実用にたえうる程度の整合性が認められる。ところが、次のステップの整合性として ϕ_d, ϕ_a, ψ_r 相互間の関係を考えて、一般にはなだ困った事態がおきる。三者間の相互の関係は一般に線形になってくれないのである。 ϕ_d, ϕ_a のゼロ点は任意に定義でき、 ψ_r のほうはゼロ点が絶対的な形でできまっているが、たとえば ϕ_d に対し ψ_r をプロットしたときに、そこに直線関係が得られるか否かということは、ゼロ点の問題には無関係である。相互に線形関係になれば、

$$\psi = f(\phi)$$

の関数形 f は ϕ_d, ϕ_a, ψ_r によってわかることになりかねない。図9に示されるように、 ϕ_d と ϕ_a とは比較的良好一致することが多いのであるが、 ψ_r がしばしば異端者になる。その一例を図10に示した¹⁸⁾¹⁹⁾。無彩色からさえた赤に至る彩度の連続を考えると、この連続体

図10 比の判断に基づく尺度と大小の差の判断に基づく尺度との非直線関係の一例（赤の彩度の場合）（Indow, 1967）

について明度の場合と同じように、 ϕ_d, ϕ_a も構成できるが、“一方は他方より約1.8倍赤い”という印象は、特に色光の場合、きわめて自然に成立するので ψ_r もまた構成できる。ところが ψ_r に対し ϕ_d, ϕ_a をプロットすると明らかに曲線になってしまう。それぞれの ϕ の内部においては整合性が認められるだけに、この非直線性は余計に目立つといわなければならない。結局、 ϕ_d の基にある色差を検出する判断、 ϕ_a の基にある色差間に同等性を設定する判断、 ψ_r の基にある比の判断が被験者の内部のいかなるプログラムにより generate されているのか、その事情が現在ではまだ十分に解明されていないので、三者間の関係も樹立できないし、それらを統合することもまだ困難なのである。

明度や彩度はともかく、一般の色差の場合には弁別閾程度の大きさだけを扱っていればよいので、それ以上大きい色差を考える必要はないから、 ϕ_d 以外は不要であるという意見も存在するであろう。色を管理する場合には、たしかにそのとおりで、実際に多くの色差式はごく小さな色差しが念頭においていない。ところが、マンセル表色系の UCS 性を検討するような場合は、もし、より大きな色差まで考慮に入れてこれを行なえば、数学的にはずっと強い形の検討が可能になる²⁰⁾。数学的にいえば、色空間の大域的性格を扱うことができるからで、それに反し、弁別閾程度の色差だけを念頭におくとは、比喩的にいえば、微分幾何学的扱いを出ない。

数学の場合には、ある空間における線素 ds の数学的構造さえきまればそれでよいのであるが、色空間のような場合、その局所的条件から空間の大域的性格は導けない。したがって、color space というものを導入するに当たっては、次の2つの道しかないであろう。

第一は、弁別閾程度の色差のみを念頭におき、色空間についても、ある色を表わす点に関しては、その近傍しか意味をもたせないという立場である。第二は、色空間という表現をとる以上、その空間としての性質にも意味をもたせるという立場で、この場合には弁別閾を相当に越えた色差を無視することはできない。

人間の感覚的情報処理機構にとって、ある程度までの色差は直観的によくわかるが、それ以上になると、いわば“scale out”して、ただ2色は“ひどく違う”というのに止まるものかもしれない。ある未開人は数をかぞえるのに、“1, 2, 3, 沢山”といい、4以上はもうその中で識別ができないといわれる。もし色差についても同じような事情が成立するとすれば、上述の第一の立場以外に方法はない。

一方、より大きな色差もまた scale out しないような感覚的情報処理機構を人間が備えているとすれば、その

事情を反映させない表現しかとらないのはもったいない話であろう。結局、人間にとってどの程度の色差までがリアルな意味をもって感得されるかということがきめ手になる。しかも、できればそれは客観的に決定されなければならない。

たとえば、すべて明度が等しくそろえられているものとし、(赤, 黄)と(赤, 緑)の2対を見せれば、普通は後者のほうがより違って見えるというであろう。(青, 緑)と(青, 黄)の2対を見せても、やはり後者のほうが色差は大きいと判断するであろう。これらは、いずれも、弁別閾をはるかに越えた色差であるが、その間でまた直観的に大小関係が明確に感じられる。しかし、この大小関係はただ人間が口でそういうだけに止まるものであろうか。Julesz は巧みな実験で、この大小関係がそ

れ以上の機能的意味をもつことを示した²¹⁾。

彼はコンピューターにより 100×100 程度の黒または白の要素(正方形)からなる任意な構造をもつランダムパターンを作り出し、いろいろな側面から、その知覚の様相を研究したが、さらにオフセット印刷と組合せることによりパターンに色をつけることにも成功した。2つのランダムパターン A_1, A_2 または B_1, B_2 が直接に境を接して左右に配置されている(図11)。

この図において、 A_1, B_1 は赤の濃度がごく、 A_2, B_2 はその濃度がうすい(α)。また A_2, B_2 は青の濃度がごく、 A_1, B_1 はその濃度がうすい(α を左右反転した形)。したがって、この赤、青に関する限り(A_1, A_2)(B_1, B_2)は同じ相違をもっている。一方、 A_1, B_2 は黄の濃度がごく、 A_2, B_1 はその濃度がうすく(β)、 A_2, B_1 は緑の濃度

図 11 ランダムパターンにおける境界線の形成(色彩のかわりに明暗で表現)(Julesz, 1965)

がこく、 A_1, B_2 はその濃度がうすい(γ)。したがって、 A_1 は赤と黄がこく、 A_2 は緑と青がこいのに反し、 B_1 は赤と緑がこく、 B_2 は青と緑がこいことになるが、この場合、赤、黄、緑、青の要素の明度をそろえておくと、明らかに A_1 と A_2 の間には明確な分岐線が見えるのに反し、 B_1 と B_2 の間ではそれが目立たない。白黒でおきかえた図11でもその事情がうかがわれるであろう。

境界線の認知はまったく自動的に自然に成立するもので、これは単に“口でそういう”というだけのものではない。そして、 (A_1, A_2) と (B_1, B_2) の間でこの相違を起こしているのは、明らかに (B_1, B_2) の間では(赤、黄)と(青、緑)といういずれも色差の小さい対になっているのに反し、 (A_1, A_2) の間では(赤、緑)と(青、黄)といういずれも色差の大きい対となっているからにはかならない。この場合、色差の小さい対といっても、その色差は弁別閾をはるかに越えた大きさで、こういう大きい色差どうしの間にも、なお、色差の大小の相違は境界線の形成というような基本的な知覚過程において異なった効果をもたらしている。

小さな要素が集まってひとつの面や境界線を形成する問題は、テレビの場合、特に意義が深いが、こういうところにも大きな色差が、人間の直観にとっての有効 scale 内の現象として作用しており、赤と黄、赤と緑のように大きな色差が scale out になるとは限らないのである。

8. む す び

測色、表色系の基礎になっている標準的データを例として、そこに含まれている判断の内容、用いられた心理物理的方法、結果の個人差について述べた。心理学的実験結果というものは、本来、視標の大きさ、周囲の状況、順応状態など実験条件のちょっとした事情により左右されやすいもので、これらを実験の文脈(context)と呼ぶとすれば、結果はなかなか文脈から独立になってくれない^{22)~24)}。ある実験結果がその文脈に依存するということは、その結果を他の条件のところへ当てはめられないということで、たとえば、テレビの画像の中にMacAdamの偏差長円を考えても、それは意味がうすいということであろう。したがって、もしテレビの画像において弁別閾を知りたいとすれば、原理的には、その条件の下で弁別閾を測定する実験を行なうほかない。それだからこそ、そういう必要性を2章において指摘したのである。

テレビの実際の場面で実験を行なう場合にも、そこで必要とされる判断の種類は3章に述べたいずれかであるに違いない。したがって、それを扱う手心も、ここに述べた標準的な心理物理実験の場合と本質的には変わらない。

い。ただ、こういう場面における実験は、標準条件下における心理物理実験よりデータの安定性はより悪くなることを覚悟する必要がある。しかし、文脈の異なるデータを流用することにより生ずる系統的誤差をとり込むよりも、たとえデータが不安定になったとしても、実際の場面で実験を行なうほうが安全なのではないかと思われる。少なくとも、そのほうが現実的であろう。

実験における文脈中の文脈ともいうべきものは、被験者の個人差であろう。これは内部雑音のようなもので、たとえばテレビの視聴者の中に、本来そういう変動が存在するのであるから、無理にこれを小さくしようと努めることは必ずしも意味をもつとは限らない。実験の文脈を強くすれば、結果は安定してくるであろうが、その情報を現実に応用する場合を考えると、そういう実験は非現実的ということになりかねないのである。

標準的データを獲得するために行なわれた基礎的な心理物理的方法においてさえ、そこに用いられている心理物理的方法は万全なものではない。たとえば、弁別閾の測定において、もし被験者がいいかげんに“区別がつく”という反応を連発したとすれば、弁別閾は見かけ上小さくなる。その被験者の反応にどの程度そういう dark current が混入しているかを検出しようと思えばそれは、信号検出理論^{25)~27)}(theory of signal detection)に則った方法をとることにより可能になる。ただ、こういう方法は非常に手数がかかるので、実際にはあまり用いられないのである。

標準的データの存在する場合には、もちろん、それを参考にすべきであるが、物理定数などと異なり、それは条件により変化するものであることを覚悟していなければならぬし、また、そこにおいてさえ、本稿に述べた程度の個人差はまぬがれないことを承知していなければならない。また、現実的なデータが必要であれば、その現場で実験を行なう以外にないということが本稿の最終結論なのである。

(参 考 文 献)

- 1) 印東太郎：色彩と画質における心理学的問題、テレビ誌、21,1 (1967) 12-20.
- 2) W. D. Wright: A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours, Trans. Opt. Soc. (London), 30 (1928-29) 141-164.
- 3) W. D. Wright: A re-determination of the mixture curves of the spectrum, Trans. Opt. Soc. (London), 31 (1929-30) 201-218.
- 4) J. Guild: The colorimetric properties of the spectrum, Phil. Trans. Roy. Soc. (London), 230 A (1931) 149-187.
- 5) J. P. Guilford: Psychometric methods, McGraw-Hill, Second Edition (1954)
- 6) W. W. Coblentz and W. B. Emerson: Relative sensibility of the average eye to light of different colors and some practical applications of radiation problems, U. S. Bureau of Standards Bull., 14 (1917) 167-236.

- 7) R. E. Bedford and G. W. Wyszecki: Luminosity functions for various field sizes and levels of retinal illuminance, *J. Opt. Soc. Amer.*, **48** (1958) 406-411.
- 8) K. S. Gibson and E. P. T. Tyndall: Visibility of radiant energy, *U. S. Bull. Bureau of Standards*, **19** (1923) 131-191.
- 9) K. S. Gibson: Spectral luminosity factors, *J. Opt. Soc. Amer.*, **30** (1940) 51-61.
- 10) H. G. Sperling: An experimental investigation of the relationship between colour mixture and luminous efficiency, *National Physical Laboratory (Ed.): Visual problems of colour. A symposium held at the National Physical Laboratory on 23rd, 24th, 25th, September, 1957*, **1, 2**, Her Majesty's Stationery Office (1958) 251-277.
- 11) D. L. MacAdam: Loci of constant hue and brightness determined with various surrounding colors, *J. Opt. Soc. Amer.*, **45** (1950) 589-595.
- 12) D. L. MacAdam: Visual sensitivities to color differences in daylight, *J. Opt. Soc. Amer.*, **32** (1942) 247-274.
- 13) H. Cramer: *Mathematical methods of statistics*, Princeton University Press, (1946).
- 14) W. R. J. Brown and D. L. MacAdam: Visual sensitivities to combined chromaticity and luminance differences, *J. Opt. Soc. Amer.*, **39** (1949) 808-834.
- 15) W. R. J. Brown: Color discrimination of twelve observers, *J. Opt. Soc. Amer.*, **47** (1957) 137-143.
- 16) D. L. MacAdam: Specification of small chromaticity differences, *J. Opt. Soc. Amer.*, **33** (1943) 18-26.
- 17) A. E. O. Munsell, L. L. Sloan and I. H. Godlove: Neutral value scales. I. Munsell neutral value scale, *J. Opt. Soc. Amer.*, **23** (1933) 394-418.
- 18) T. Indow and S. S. Stevens: Scaling of saturation and hue, *Perception and Psychophysics*, **1** (1966) 253-271.
- 19) T. Indow: Saturation scales for red, *Vision Res.*, **7** (1967) 481-495.
- 20) T. Indow: Two kinds of multidimensional scaling methods as tools for investigation color space from the macroscopic point of view, *Acta Chromatica*, **1, 2** (1963) 60-71.
- 21) B. Julesz: Texture and visual perception, *Scientific American*, Feb., (1965) 38-48.
- 22) 印東太郎: 色彩における context-free, —context bounded の問題— 色科ニューズ, **15, 4** (1969) 26-27.
- 23) T. Indow and C. Takagi: Hue-discrimination thresholds and hue-coefficients—Comparisons among data—, *Japanese Psychological Res.*, **10** (1968) 179-190.
- 24) T. Indow and K. Matsushima: Local multidimensional mapping of Munsell color space, *Acta Chromatica*, **2** (1969) 16-24.
- 25) D. M. Green and J. A. Swets: *Signal detection theory and psychophysics*, (Wiley), (1966).
- 26) J. A. Swets (Ed.): *Signal detection and recognition by human observers*, *Contemporary Readings*, (Wiley), (1964).
- 27) 印東太郎: 人間機械系における人間の判断, 計測と制御, **2** (1963) 235-243.

新講座連載のお知らせ

昭和 44 年 11 月号から連載してきました「色彩心理と測色」は今回をもって終了しました。引きつづき昭和 46 年 1 月から下記の新講座を連載いたします。

講座「テレビ放送のソフトウェア」

——番組制作と運用技術——

第 1 回 新しいカラー調整技術——伊藤安雄 (NHK)