色彩と画質における心理学的問題

慶応義塾大学 心理学研究室 印 東 太 郎

色彩, 画質に関し実験を行なうとすれば, 一度はそれらに対する人間の判断, 評価を求めなければならぬ。そういう場合における判断の導入と管理, 判断結果の処理法などの問題点を, 事例をあげながら, 指摘することを試みた。特に, 検知限, 弁別限の測定にとどまらず, 感覚を数量的に表現する尺度の構成に重点がおかれている。

1. ま え が き

色彩は, OSA (Optical Society of America) の規定によると, “物理的刺激と心理的反応との関係” に関するという意味で, 心理物理的概念 (psychophysical concept) と呼ばれているが, その意味では画質もまた同様で, こういう問題について実験を行なうとすれば, そのどこかのステップで人間の判断, 評価を含めないわけにはゆかない。本稿においては, こういう場合における人間判断の導入と統制, その処理法などの問題点につき少しく述べることにする。この種の実験に用いられる判断は, 大別すると, 次の4つの型にわけられるであろう。

- 1° 同一 (identity) の設定, それからの相違の検出
- 2° 同等 (equivalence) の設定, それからの相違の検出
- 3° 相違 (difference) の大きさの評定
- 4° 比 (ratio) の大きさの評定

以下, 色彩, 画質の領域の中から, それぞれの型の判断が用いられている事例, その問題点について述べる。なお, 実験の試験台になっている人を被験者 (subject) と呼び, 感覚をおこす物理的条件を刺激 (stimulus) ということにする。

2. 同一の設定, それからの相違の検出——視覚の伝達関数とグレア光の制止効果の場合

視覚の解像力を表わすのに, 従来のような, ランドル

筆者紹介

いんどう たろう
印東太郎 昭和20年, 慶応義塾大学文学部心理学科卒業。昭和36年, 慶応義塾大学教授 (文学部・心理学, 工学部・管理工学), 昭和38年より41年まで Harvard 大学, Carnegie Institute of Technology にて研究と教育に従事。昭和39年 ΣΨ 協会会員に推薦される。専攻は計量心理学, 特に視知覚と思考過程の実験および数学理論的研究。文学博士。

“Psychological Problems in Color System and in Picture Quality Assessment” by Tarow Indow (Department of Psychology, Keio University, Tokyo)

氏環などの視力表により視力1.2などのスカラーとしてこれをとらえるのとは異なり, 空間周波数 (spatial frequency) ω 上のスペクトラムとして表現するのは最近の流行である¹⁾⁻³⁾。これは電気通信系において用いられている手法そのもので, ただ, 時間軸 t を空間軸 x におきかえ, したがって, 水平線上に並ぶ黒白のしまを波形の入力信号 $f(x)$, これがいかに変形されて見えるかを視覚系の出力信号 $g(x)$ と考え, 両者の関係から視覚のボケ関数 (spread function) $h(x)$, あるいは伝達関数 (transfer function), すなわち, そのフーリエ変換 $H(\omega)$ を求めることにほかならない。伝達関数を測定するにはいろいろな方法があるが, x 軸上で正弦波状に輝度 B の変化しているパターン

$$f(x) = B_0(1 + m_0 \cos \omega x) \quad (1)$$

$$m_0 = \frac{\Delta B}{B_0}$$

を提示したとすれば, 次のような方法が用いられる。ただし, B_0 は平均輝度, ΔB は明暗のしまの振幅である。視覚系が線形であれば, $\varphi(\omega)$ を位相として, 出力信号は

$$g(x) = B_0[1 + m \cos\{(\omega - \varphi(\omega))x\}] \quad (2)$$

$$m = m_0 |H(\omega)|$$

であり, 一方, m は目に見えている明暗のしまの変調度であるから, これを $\Delta I/I_0$ と書くと,

$$|H(\omega)| = \frac{m}{m_0} = \left(\frac{\Delta I}{I_0}\right) \frac{B_0}{\Delta B} \quad (3)$$

である。したがって, いろいろな幅 ($2\pi/\omega$) をもつパターンを用い, そのつど, どの ω の場合もしまの明暗の差が一定の大きさに見えるような ΔB の値を測定すれば, この場合 $\Delta I/I_0$ は ω によらない定数であるから, $B_0/\Delta B$ が伝達関数 $H(\omega)$ を与えることになるのである。

B_0 が一定であれば I_0 も一定と考えられるから, 明暗

写真1 視覚系の伝達関数を測定するための輝度が正弦波状に変化しているパターン（下半分）
(NHK 技研提供)

の差が一定の大きさ ΔI に見えるところをおさえればよいのであるが、そのためによく用いられるのは、テレビ受像機の画面上半分には一様の輝度 B_0 を与え、下半分に(1)式の形で輝度の明暗を作り(写真1)、その ΔB を変化させ、人間の眼にちょうどしまの現われて見えてくる ΔB_0 の値を測る方法である。 $\Delta B < \Delta B_0$ では下半分も一様に見え、結局、画面全体が一様の明るさであり、 $\Delta B > \Delta B_0$ になってはじめて下半分には明暗のしまが現われ、画面の上下が異なって見える。

したがって、この場合、被験者の下さなければならぬ判断は、画面全体が同一に見えるか、上下に相違が認められるかという前掲1°の型の判断で、同一の設定、相違の検出という2つの心理的状態の分岐点は、その意味で、どの ω のパターンを用いた場合も、 ΔI としては同じ状態 ΔI_0 にあると考えられるであろう。この ΔI_0 という分岐点に相当する状態を作り出す輝度差 ΔB_0 は、最小可知差異(just noticeable difference, 略して jnd)あるいは弁別閾、弁別限(difference threshold)と呼ばれる。

同じく前掲1°の型の判断の必要とされる例をもう1つあげよう。周知のように、テレビの画面の上に黒が見えるには、同じ画面の中に白の部分の存在することが必要条件である。全面が一様な画面は、いかに輝度を下げても、灰色に見えても黒には見えない。黒の知覚は低輝度の部分が周囲の高輝度の部分から、生理・心理的過程として、一種の制止効果をうけてはじめて成立する。この制止効果を調べる目的で行なわれた実験のひとつに次のようなものがある⁴⁾。

左眼に視角 4.6 分、輝度 118 dB のグレア(glare) 光点Gと、視角 6.5 分、輝度 B_T の光点Tとを提示する。なお、輝度は暗順応眼の刺激閾、検知限(はじめて光の認められる輝度)に相当する $10^{-10} L$ を基準とする dB で表示されている。光点Tは常に視野の中央、光点Gは左方いろいろな位置に提示されることがある。一方、右眼にはTと同大の可変光点Mのみが与えられ、被験者はTとMとの明るさが等しく見えるまでMの輝度 B_M を調節する。Tは左眼、Mは右眼にのみ与えられているのであるが、被験者にとってはTとMとが暗黒の視野の

図1 左眼に与えられたグレア光の左眼の光点Tに及ぼす制止効果
縦軸は光点Tと同じ明るさに見える右眼の光点Mの輝度
($10^{-10} L$ を 0 dB)

中央に横に並んで見えるようになっている。もちろん、光点Gが与えられなければ、かなりよい精度で $B_M = B_T$ となるのであるが、光点Gが入ると、左眼においてはTの明るさがGによって制止されるので、 $B_M < B_T$ にしないとMとTとは同じ明るさには見えない。

こういう方法で、118 dBの光点GとTとの空間的間隔(視角)をパラメーターとし、光点Tの輝度 B_T をいろいろの輝度にした場合に、眼には同一の明るさを与える光点Mの輝度 B_M の値を示したのが図1で、たとえば、Gとの間隔が13分の場合、90 dBのTは約72 dBのMに等しい明るさに見えているというふうに読むのである。この実験においても、被験者に求められているのはMとTとの間の明るさに関する同一の設定であり、そのためには相違の検出されなくなるまでMの輝度を変化させるという操作を伴っている。 B_M は標準 B_T に心理的に等価であるという意味で、主観的等価点(point of subjective equality, 略して pse)といわれる。

上記のように、弁別閾 jnd や主観的等価点 pse など測定するには、同一の設定、それからの相違の検出などという判断を必要とするが、こういう判断1°はその意味がはっきりしているのも、jnd や pse は物理系科学や技術系の方々にも、比較的、抵抗なしに受け入れられているように思われる。

しかし、jnd や pse だけからわれわれの欲しい情報のすべてが得られるとは限らない。たとえば、上例でも、118 dBのGが13分離れたTに及ぼす制止効果は $90 - 72 = 18$ dB という事実はわかって、この制止がTの目に見えている明るさをどれだけ減少させていることになるのか、それはこの18 dBという数値だけでは答えられないので、そのためには、輝度という物理的条件とそれが視覚においてひきおこす効果、目に見えている明

るさとの対応関係を知っていなければならないが、この対応関係を樹立するには、後述するように、 3° あるいは 4° の型の判断が必要になってくるのである。

この問題に立入る前に、 2° の型の判断を用いる例を次にあげることにする。

3. 同等の設定、それから相違の検出—— 比視感度曲線の場合、その他

測光や測色の体系はひとつの規格として通用するもので (JIS, Z 8105, Z 8701, Z 8721, Z 8722), たとえば、照度は照度計のスケールの上で直読される lx を単位とする物理量と思われるであろう。しかし、本稿の冒頭にも述べたように、色彩も光も心理物理的概念であり、たとえば、測光とは放射束 (radiant flux) がもつ人間の目に明るさの感じをひきおこす能力の測定であって、放射束そのものは純物理的なもので、Wによって表わされるが、測光のほうはそれに上述の能力の加味されていることに注意しなければならない。周知のように、 1 lx は 1 m^2 の面が 1 lm の光束を受ける場合で、光束 (luminous flux) F は

$$F = \left[680 \int_0 P_\lambda V_\lambda d\lambda \right] \text{ lm/W} \quad (4)$$

で与えられる。積分の範囲は可視波長、 P_λ は単位波長幅 μ 当りの放射束 W/μ 、 V_λ はその放射束が目に見えるさの感覚をひきおこす相対的能力を表わす係数で、標準比視感度 (standard luminosity) と呼ばれ、次のような実験によって定められたものである。

特定の基礎刺激 (basic stimulus), たとえば標準白色, を一定の放射束に固定し、各波長 λ の刺激の放射束をこの標準刺激と同じ明るさに見えるまで変化し、両者が明るさに関し同等になったときの放射束を P_λ とすれば、

$$V_\lambda \propto \frac{1}{P_\lambda}$$

とすればよく、通常、 $1/P_\lambda$ の最大になる $\lambda=555\text{ m}\mu$ の V の値が 1 と約束されている。この場合、上述の同等を定義する操作にはいろいろあるが、論理的に最も直截なのは基礎刺激と波長 λ の刺激とを直接に見くらべ、両者が同じ明るさに見えるかどうかを判断することであろう。すなわち、 2° の型の判断が必要とされる。

これが同等の設定であって、同一の設定と呼ばれないのは、いかに変化しても両者は完全に同一、すなわち、空間的に境を接する形で提示されていても、その境界線が消滅するという形では同じにならないからである。両者は色調においては異なっているので、明るさというひとつの側面に関して同等であるというのにすぎない。したがって、一般にマッチングと呼ばれる 2° の判断は 1°

の場合よりもその内容が明澄性を欠くことになりやすく、どこで同等と認めるか、その規準は被験者により、あるいは、同じ被験者でも場合により、変動するおそれがある。上述の V_λ を規定する実験において、交照法 (flicker method) のように、論理的にはやや間接的な形で明るさに関する同等を定める方法の用いられるのはそのためであろう。

いずれにせよ、照度や輝度はそれぞれの計器で直読できる形になっているにしても、それは計器のスケールが (4) 式に合わせて較正されているからで、これを Luther 条件という。計器の背後には 2° の型の判断を基にした実験があるといわなければならない。

前節に述べた視覚の伝達関数の決定も、 2° の型の判断を通じてこれを行なうこともできる。(3) 式において空間周波数 ω に無関数な ΔI を求めるところで、弁別閾 ΔI_0 の形で各 ω に関し同一な ΔI を定義するかわりに、テレビ画面の上下に 2 つの異なる空間周波数 ω_0, ω をもつ正弦波パターンを入れ、一方の振幅 ΔB_0 は固定し、他方の ΔB を変化させ、目で見て、両者が同じ明暗の差 ΔI をもつように見えるところを決定するマッチングを行なってもよいことは明らかであろう。この場合も、明暗のしまの幅は上下のパターンで異なるので、完全な同一の設定ではなく、しまの間の明暗の知覚上の差 ΔI に関する同等の設定になるのである。

再び測光の例にもどるが、標準比視感度 V_λ の定義から、どの波長 λ においても、 $P_\lambda V_\lambda$ の値が等しければ、これら単波長光はすべて同じ明るさに見えるなければならない。しかし、いくつかの波長 λ を含む複合波長光どうしの中で、(4) 式で与えられる F の値が一定であれば、それら複合光はいずれも同じ明るさに見えるかどうかは別個の問題で、同じ明るさに見えるためには波長の上で明るさの加法性 (additivity) の成立することが前提になっている。

この前提の妥当性に対して疑義をはさむ実験結果は、最近、いくつか発表されているが⁵⁾、本稿では立ち入らないことにしたい。しかし、かりに加法性が成立し、たとえば (4) 式を基礎に定義されている輝度 B が視覚的な明るさに対する物理条件の忠実な表現であるとしても、それは B の値の等しい光は、その組成が何であろうと、常に等しい明るさに見えるということしか保証できない。したがって、 B は明るさの感覚に対応する数量には違いないにしても、 B の数値がどれだけ変化したときに明るさがどう変わって見えるかを告げることができないという意味では、Yurov⁶⁾ も指摘しているように、lower metrics であるが higher metrics ではないのである。

4. 感覚尺度の構成

一般に、感覚そのものが数量的に表現されるものとして、これを Ψ で表わし、一方、その感覚をひきおこす物理条件、刺激を表わす数量を ϕ として、 $\Psi=f(\phi)$ と両者の対応関係を樹立することを感覚尺度 (sensory scale) の構成、あるいは、心理物理的尺度化 (psychophysical scaling) という。前節 3. の最後に述べたことも、2. の最後に指摘したことも、 ϕ としての輝度 B に対応する明るさの感覚尺度 ϕ が必要とされるということにはほかならない。感覚尺度を構成する方法にはいろいろあるが、次の 3 つの場合について簡単に述べ、それぞれの方法で構成された結果を Ψ_A , Ψ_d , Ψ_r で表わすことにする。

- (A) 最小可知差異 jnd に立脚した尺度 (Ψ_A)
- (B) 感覚の間に感じられる差の印象に立脚した尺度 (Ψ_d)
- (C) 感覚の間に感じられる比の印象に立脚した尺度 (Ψ_r)

まず、 Ψ_A について述べる。1° の型の判断その他を含む実験により、jnd が刺激 ϕ の関数として与えられているものとする。実際には jnd は、それだけの差をもつ 2 つの ϕ はある一定の確率 π 、たとえば 0.75 で弁別されるという形でとらえられるので、それは ϕ の関数であると同時に、指定された確率 π の関数でもある。そこで、jnd を $\Delta(\phi, \pi)$ で表わし、これから

$$\Psi_A[\phi + \Delta(\phi, \pi)] - \Psi_A(\phi) = g(\pi) \quad (5)$$

という条件を充足する Ψ_A を求めるのが (A) である。一定の確率 π をもって弁別される 2 つの刺激 ϕ と $[\phi + \Delta(\phi, \pi)]$ とは、 ϕ の値のいかんを問わず、 Ψ_A の上では常に同一の間隔 $g(\pi)$ をもつ 2 点に対応することになるのである⁷⁾。もし、いわゆる Weber の法則が成立し、

$$\frac{\Delta(\phi, \pi)}{\phi} = K(\pi)$$

であれば、

$$\Psi_A(\phi) = A \log \phi + B$$

すなわち、Fechner の法則としてひろく知られているものになる。

次に (B) の Ψ_d について述べる。たとえば、2 つの刺激 ϕ_1 , ϕ_4 を固定しておき、 ϕ_2 , ϕ_3 を適当に調整して、感覚的に一定のステップで変化する系列、

$$\Psi_d(\phi_4) - \Psi_d(\phi_3) = \Psi_d(\phi_3) - \Psi_d(\phi_2) = \Psi_d(\phi_2) - \Psi_d(\phi_1)$$

を作る。すなわち、2 つの ϕ に対応する感覚の間を感覚的に何等分かすることを被験者に求めるというのもひとつの方法で、これを等分割法 (method of equisection) という。感覚の差についてのマッチングが行なわれているわけで、3° の型に属する判断のひとつである。感覚

の差と差との間の同等の設定であるから、2° の型の同等の設定よりさらに一段と判断内容は明澄さを欠くように見えるであろう。

3° に属する判断としては、1 組の刺激 ϕ_i , ϕ_j について、被験者に $\Psi_d(\phi_i) > \Psi_d(\phi_j)$ の判定だけを求め、そう判定される確率を $i, j=1, 2, \dots$ について組織的に実測し、これから Ψ_d を構成する方法などいろいろある。いずれの場合も、被験者が感覚の相違の大きさを consistent に評定しているか否か、評定の一貫性の検討を充分に加えておかなければならない。

たとえば、 ϕ_1 , ϕ_4 について等分割を行ない、上述の条件をみたす ϕ_2 , ϕ_3 が求められ、さらに、 ϕ_3 と ϕ_4 を用い、

$$\Psi_d(\phi_5) - \Psi_d(\phi_4) = \Psi_d(\phi_4) - \Psi_d(\phi_3)$$

の条件をみたす ϕ_5 を求めた—この場合には外挿—とすれば、次に ϕ_1 と ϕ_5 とを 2 等分割した場合、この間を感覚的に 2 分する ϕ の値は、被験者が一貫性をもって分等を行なっている限り、誤差範囲内で ϕ_3 に一致していなければならないことは明らかであろう。こういう検討を加えながら実験を行なってみると、明るさや色彩、その他、感覚一般にわたって、人間は 3° の型の判断をある程度一貫して行なえることがわかってきた。

この尺度 Ψ_d は、

$$\Psi_d(\phi_i) - \Psi_d(\phi_j) = \text{const.} \quad (6)$$

であれば、 ϕ_i と ϕ_j に対応する 2 つの感覚は常に同じ程度の相違をもって感じられるという意味をもつのであるが、多分、普通に懸念されるよりはよい精度をもってこういう感覚尺度を構成することができる。一例を図 2 に示したが、5 人の被験者が赤について彩度 (saturation) の尺度 Ψ_d を、いろいろな区間をもつ刺激について、等分割法で構成した結果とその平均値で、判断に一貫性がなければ、異なった区間の分割がすべて 1 つに重なることはない。また、こうして数量化された彩度 Ψ_d は、刺激純度 (colorimetric purity) ϕ に対し、どの被験者においても、直線の関係をもつことが示されている。以上の

図 2 等分法による赤の彩度の尺度
(横軸の輝度純度は刺激光の中に含まれる 632 mμ 光の輝度の百分率)

議論はすべて感覚の変化が、1次元の場合のことであるが、同様の考察を多次元の場合に拡張することもできる。

感覚に関し、相違の大きさの評定が可能であるとすれば、比の大きさの評定もまた可能であろうということが期待される。事実、固定した輝度 B_0 をもつ標準刺激と1つの変化刺激とを見くらべて、それが標準刺激の半分の明るさに見えるようその輝度を変化させると、周囲の条件、眼の順応の状態などの条件が統制されていれば、普通の被験者は、大略、 $B_{1/2}=B_0/8.2$ にセットする。したがって、 $\Psi_r(B_{1/2})=\Psi_r(B_0)/2$ というふうに Ψ_r の数値をきめてゆくと、一般に

$$\frac{\Psi_r(\phi_i)}{\Psi_r(\phi_j)}=R \quad (7)$$

であれば、 ϕ_i に対応する感覚は ϕ_j に対応する感覚の R 倍という意味をもつ尺度 Ψ_r を構成することができる。この場合も 4° の型の比の大きさの判断の一貫性を検討しておかなければならない。たとえば、

$$\frac{\Psi_r(\phi_i)}{\Psi_r(\phi_j)}=R_{ij}$$

$$\frac{\Psi_r(\phi_j)}{\Psi_r(\phi_k)}=R_{jk}$$

であれば、

$$\frac{\Psi_r(\phi_i)}{\Psi_r(\phi_j)} \cdot \frac{\Psi_r(\phi_j)}{\Psi_r(\phi_k)} = \frac{\Psi_r(\phi_i)}{\Psi_r(\phi_k)} = R_{ik}$$

であるから、 (ϕ_i, ϕ_j) , (ϕ_j, ϕ_k) , (ϕ_i, ϕ_k) に対する感覚の比の判断の中には

$$R_{ik}=R_{ij}R_{jk}$$

という関係がなければならないので、こういう一貫性を調べてみると、感覚的印象に関する判断の場合は、かなりよい精度をもっているのである。

感覚どうしの間における相違、比の関係は、人間の扱う情報の中で、量的情報 (quantitative information) というべきものであろう。そのうえで jnd に対応する飛躍が一定になる Ψ_d [(5) 式]、その上における一定の差は感覚的に同じ相違に感じられる Ψ_a [(6) 式]、その比が感覚的に感じられる比を与える Ψ_r [(7) 式] など、それぞれ、それ自身においては一貫性をもつ感覚尺度が構成できるのは、人間の量的情報処理がそれを可能にする特性を備えているからであろう。しかし、3つの尺度 Ψ_d , Ψ_a , Ψ_r は、多くの感覚領域において、相互に一致せず、 Ψ_d , Ψ_a を Ψ_r に対してプロットすると、常に上に凸な曲線になってしまい、しかも、常に Ψ_d のほうが Ψ_a よりもより曲ることが判明した。一例として、図2にも掲げた赤の彩度に関する3種の尺度の関係を図3に示した。

この事実は、人間の量的情報処理過程は infinitesimal,

図3 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)

任意の大きさをもつ差、比の3者を同一連続量によって表現できるような形では行なわれていないことを示すと解釈されるべきであろう。すなわち、原理的には、 Ψ_d , Ψ_r の上では jnd に対し (5) 式が成立せず、 Ψ_d , Ψ_r の上ではその上で同じ差をもつ2つの一対の感覚はそれぞれ等しい相違をもつものとは感ぜられない [(6) 式が成立しない]、また、 Ψ_d , Ψ_r の比は2つの感覚の間に人間の感じる比を与える力はない [(7) 式が成立しない] といわなければならない。やっかいなことであるが、人間のもつ量的情報処理過程はそういうふうに行っているのである。

なお、多くの感覚領域について経験を重ねた結果、ハーバード大学の S. S. Stevens は次の事実を見出した。一般に、感覚尺度と刺激との関数関係 $\Psi=f(\phi)$ は、

$$\Psi_d = A \log \phi + B \quad (8)$$

$$\Psi_r = a(\phi - \phi_0)^b \quad (9)$$

で表わされ、 Ψ_d はこの対数関数とべき関数との間の形をとるというのである。(8)式は、すでに述べたように、Fechner の法則と呼ばれるもので、jnd について Weber の法則が成り立つことを暗示し、 A と B は Ψ の原点と単位をきめる定数である。一方、(9)式の ϕ_0 は刺激閾、検知限であるが、皮膚における温度の感覚というような場合を除けば、十分に小さいので、普通は

$$\Psi_r = a\phi^b \quad (10)$$

として扱う。比に立脚した明るさの尺度 Ψ_r も輝度 ϕ に対し (9) 式の形で表わされ、 $\phi_0 = 7 \times 10^{-7} \text{ mL}$, $b = 0.33$ である。式のうえではテレビ映像管の光電変換特性、入射光束と信号電流の関係に依っているであろう。また、(10)式で近似することができ、ガンマに相当する b が上述の値であるから、先に書いたように、輝度 B_0 に対し半分の明るさに見える輝度 $B_{1/2}$ を考えると、 Ψ_r の比が 0.5 の場合であるから、

$$0.5 = \left(\frac{B_{1/2}}{B_0} \right)^{0.33}$$

すなわち、 $B_{1/2}/B_0$ は B_0 のレベルにかかわらず定数になり、かつ、その比は 1/8.2 になるのである。 $B=1 \text{ mL}$ のとき、 $\Psi_r=1$ と定義した比に立脚した明るさの感覚尺

度を bril と称するが、すると図 1 に関して述べたグレア光 G の制止効果、光点 T の pse の 90 dB から 72 dB への減少は、46.24 bril から 11.63 bril への減少、すなわち、光点 T の明るさは制止により $11.63/46.24 \approx 1/4$ に落ちていることがわかる。

このように Ψ_r はその数値から感覚上の比例関係を告げることができるが、そのかわり、感覚上の相違の大きさを正しく伝えない。したがって、 $46.24 - 11.63 \approx 34.6$ であり、たとえば、110 dB と 107.7 dB が bril のうえで $209 - 174.4 = 34.6$ と同じ大きさの差をもっている、90 dB と 72 dB は 110 dB と 107.7 dB よりかなり大きな明るさの相違として見えるであろう。ついでに、110 dB から 107.7 dB への減少は $174.4/209 = 1/1.2$ の比として見えることは事実である。

感覚どうしの間の差と比の判断が 2 つの異なる尺度 Ψ_d, Ψ_r に導くとしたら、どうした場合にどちらの尺度を用いるべきであろうかという疑問が当然おこるであろう。筆者には、当該場面において、比と差の印象のいずれが、人間により自然に、より自発的に生じてくるかによってきめる以外にないと思われる。その理由はわからないが、音の強さ (loudness)、開口色 (aperture color) や照明の明るさにおいては、比の印象のほうがより自然発生的な感じをうける。この事実は、異なる強さで手を 2 回たたいてみても、ワットの異なる 2 つの電球を交互に点灯してみても、容易に検証されるであろう。ある範囲内では、2 者の間に何倍あるいは何分の 1 という印象がきわめて自然に生じる。しかし、物体色の明度や彩度においては、事情が異なり、たとえば、2 つの灰色色紙を並べると、一方が他方の何倍あるいは何分の 1 白っぽい、あるいは、黒っぽいという比の印象よりは、白さあるいは黒さのうえで両者がどの位へだたっているかという相違、距離の印象のほうが、この場合には、より根元的のように思われる。マンルセ表色系の研究がもたらした色差を中心に行なわれてきたゆえんである。すると、興味ある問題は、テレビジョンの画面上の黒白、色彩の現象的性格が開口色、物体色のいずれにより近いかということ、それにより比と差のどちらがこの場合により自然かということがきまるであろう。残念ながら、現在のところ、筆者はこの疑問に答える資料をもち合わせていない。

5. 比の大きさの評定——対比現象の場合

マクベス照度計の視野の同心円の外円に一定の輝度 B_0 を入れ、その目に与える明るさを Ψ_0 とし、内面の輝度 B_I をいろいろに変え、その明るさ Ψ_I が Ψ_0 の $1/2, 1/3$ などに見えるよう調節させると、比に立脚した

図 4 同心円の外円 (O) の内円 (I) に及ぼす対比効果
横軸は外円 (一番上の実線) あるいは内円 (各点線) の輝度 (10^{-10} L が 0 dB)、縦軸は比の判断に基づく外円、内円の明るさ (図中の % については本文参照)

明るさの感覚尺度のこういう条件の下における変化を追跡することができる⁸⁾(図 4)。図の横軸は B_0 および B_I の値、縦軸は Ψ_r を上掲 bril の単位で示し、両軸とも対数で表わしてある。外円の Ψ_r は (10) 式の形、0.33 の勾配をもつ右上りの一番上の直線になるが、内円の明るさは、 $B_I < B_0$ の限り、周囲からの制止効果をうけ、 B_0 が同じ値をもつ場合にくらべると、 B_I に対応する Ψ_r はより小さな値になり、 B_0 をパラメーターとして、 B_I に応ずる Ψ_r の変化が右上りの各点線で与えられている。たとえば、 B_0 が 50 dB の場合(左から 2 本目の点線)、 $B_I = 40$ dB に対する Ψ_r は、本来なら 1 になるべきところが約 0.26 になっており、約 $1/4$ に明るさが落ち、さらに $B_I = 80$ dB になると、 $B_0 = 90$ dB の場合に B_I に対する Ψ_r は 20.5 からその 145 分の 1 の 0.14 になっているのである。

これは視覚の対比現象 (contrast) と呼ばれ、ここにテレビ画面あるいはスライドの投射面に黒の見える基礎がある。この条件の下では、対比は $B_I < B_0$ の場合にのみ生ずる。 $B_I \geq B_0$ になると、内円は外円からの制止も促進も受けなくなるので、内円の明るさ Ψ_r は B_I の増加につれ一番上の実線 [(10) 式] にしたがって変化するようになる。

図の中の他の実線は、それと点線との交点 (○印) の輝度 B_I と点線に対応する B_0 との比が一定になるところを結んだもので、たとえば、一番下の実線においては常に $B_I/B_0 \times 100 = 3.7\%$ である。この値は同一照明下にある白紙と黒紙との反射光の輝度の比に等しい。したがって、こういう白と黒との感覚上の比、 B_0 に対応する Ψ_r と B_I に対応する Ψ_r との比は、 $B_0 = 40$ dB (一番左の点線) においては $1/0.14 \approx 7$ にすぎないのに反し、 $B_0 = 80$ dB (左から 5 本目の点線) においては $20.5/0.015$

≒1460 に達している。

白紙の上におかれた黒紙は、前者の反射光が $B_0=40$ dB、後者の反射光 $B_l=25$ dB の暗い照明下におかれたときより、 $B_0=80$ dB、 $B_l=65$ dB になる明るい照明下にあるときのほうが、白はより白く、黒はより黒く見えるのである。しかも、白は約 20 倍白く見え、一方、黒は $65\text{ dB}-25\text{ dB}=40\text{ dB}$ 、すなわち 1,000 倍も強い光を目に送っているにもかかわらず、約 100 分の 1 (0.14 : 0.015) の明るさに見えていることに注意しなければならない。

ただし、この計算は、同一照明下にある白紙と黒紙の見え方は、それぞれの反射光の値を図 4 に代入したとおりにきまるという前提に立っているが、これは前節の最後にも述べた開口色と物体色との見え方の相違を無視した議論にほかならない。図 4 は開口色の明るさに関する Ψ_r と B との関係であるが、物体色の場合にも、完全に同じ関係が成立するときめてかかることは、次節に述べるように、正しくないであろう。それにしても、上述の結果が、定性的には、物体色についても妥当する事実は、容易に確かめられる。白紙の上に黒紙をおき、照度を変化させて見れば、照度を高めたほうが、白はますます白くなると同時に、黒はますます黒く一同時に輝いた黒に見えるが一見えるであろう。

6. 表色系における Ψ_r と Ψ_a

表色系(color system)の構成は、従来、もっぱら差の判断にもとづいて行なわれ、infinitesimal の差 jnd を用いるか、あるいは、より大きな色差を用いるかであった。前者の例としては MacAdam⁹⁾¹⁰⁾ や Wright¹¹⁾ の jnd にもとづく uniform chromaticity scale (UCS 色度図)の構成¹²⁾、後者の例としては、一般的には、OSA 委員会によるマンセル表色系の検討¹³⁾¹⁴⁾などがあげられるが、ここではマンセル明度尺度(Munsell value scale)について少し述べる。

これは、物体色としての無彩色の目に見える白さを、それがほとんど照度と独立に定義できるところから、視感反射率 ϕ の関数として与えるもので、もともと、(A) の jnd にもとづく構成 (Ψ_a) と、(B) の等分割法による構成 (Ψ_a) によって定義されたが¹⁵⁾、重点は等分割法におかれている。以下、これを V で表わすが、多少無理をすると、(10)式のベキ関数で表わせ、そのベキ b は 0.2~0.33 程度である。一方、物体色の白さの度合についても、多少無理をすれば、比の判断を行なうことができ、一貫性はあまり芳しくないが、とにかく Ψ_r にまとめると、 Ψ_r も ϕ のベキ関数となり、そのベキ b は 1.2 である。

ここに 2 つの事実が見られるであろう。ひとつは、同じく明るさを示す Ψ_r であっても、開口色の場合は輝度 B に対し $b=0.33$ のベキ関数であったのに反し、物体色においては、視感反射率 ϕ 、したがって、反射光の輝度に対し $b=1.2$ のベキ関数という事実で、実際、この 2 つは性格的に異なった見え方をしているといわなければならない。前者は明るい一暗いの明るさであり、後者は黒一白の白さである。

もうひとつは、物体色の白さを表わす 2 つの感覚尺度、 Ψ_a に相当する V と Ψ_r とは、同じく視感反射率 ϕ のベキ関数で表わせるにしても、ベキ b の値が相当に異なるという事実で、これは図 3 にひとつの例を示した Ψ_r と Ψ_a の一般的関係と同じ結果を示している。しかも、 Ψ_a としての V と Ψ_r (任意の単位で表わしてある) との非直線関係は、音の大きさにおける 2 つの感覚尺度、 Ψ_a としての λ scale¹⁶⁾ と Ψ_r としての sone scale¹⁷⁾ との非直線関係ときわめてよく似ているのである(図 5)。

こういう非直線関係は、おそらく、視覚系なり、聴覚系なりという感覚生理過程の特性ではなく、諸感覚過程に共通に作動する人間の量的情報処理過程そのものの特性に由来するものであろう。

すでに指摘したように、開口色の場合、その明るさについては比の印象が、比較的、自然発生的であるが、彩度についてもまた、開口色であれば、比の印象はきわめて自然に発生する。それは、ちょうど、色紙など物体色の彩度であれば色差、相違の印象が自然であると同程度に自然であるように思われる。開口色の彩度に関する感覚尺度 Ψ_r については、すでに図 2、図 3 にその一例を示したが、四原色(primary hues)のいろいろな輝度レベルにおいて、彩度の Ψ_r を構成してみると、それは

図 5 比の判断に基づく尺度と差の判断に基づく尺度との非直線関係の例
音の大きさ (点線, sone および λ 尺度), 表面色の白さ (実線, $\Psi_r(\text{brill})$ および V (マンセル明度))

図 6 四原色（赤，黄，緑，青）における比の判断に基づく彩度の尺度
横軸の輝度純度は刺激光中における各単光色成分の輝度の百分率

常に輝度純度 ϕ の (10) 式の形のベキ関数となり、赤、緑、青においてはベキ b の値は輝度 B によってあまり変化しないが、黄においては b の値は B の増加につれ著しく増加することが見出された(図 6)。

各色調に対する Ψ_r は共通の単位をもって表わされており、したがって、 Ψ_r の値が同一なら、どの色調、どの明度においても、彩度としては同じ程度の色づき具合に見える。四原色の主波長 (dominant wave-length) λ_d は、赤、黄、緑、青に対し、それぞれ、632, 579, 537, 478 m μ 、図中、dB は 10^{-10} L を 1 とする輝度 B 、各直線の上端の数値は単色光、すなわち、 $\phi=100\%$ に対する Ψ_r の値 (1 mL の単色光の赤の Ψ_r を 100 と定義)、各直線の下端は、この測定条件における彩度の刺激閾、検定限を示している¹⁸⁾。

彩度の Ψ_r は、オレンジ、黄緑のような中間色の λ_d においても、同じく輝度純度 ϕ のベキ関数であり、そのベキ b はその中間色をはさむ二原色の b の中間の値になる。ところで、彩度は無彩色からその λ_d の色調までの知覚上の変化であり、輝度純度 ϕ は白色光 W と単波長光 λ_d との輝度で表わした混合比である。したがって、彩度の Ψ_r において上述のような事実が成立するとすれば、次のような形の色調の変化に対しても同じような関係が見出されても、不思議ではないように思われ、事実、それが認められた。

それは、隣接する 2 つの原色、たとえば赤と黄、の輝

度で表わした混合比を ϕ とし、それに応ずる黄、橙、赤という色調の変化の中で、たとえば、赤の気味、赤の濃さの変化を表わす Ψ_r を構成すると、 Ψ_r は ϕ の (10) 式の形のベキ関数となるのである。また、同じ赤の濃さについて、色差の判断に立脚した Ψ_a を作ると、上述の Ψ_r とこの Ψ_a との関係は、図 3 に示された赤の彩度の場合における Ψ_r と Ψ_a との対応とまったく同じ非直線関係が認められた¹⁸⁾。

色調のような、いわば質的 (qualitative) 変化にあっても、その中における知覚上の成分の分量 (quantity) に関する比や差になると、ここにも人間の量的情報処理過程が介入し、その特性である非直線関係が現われるのである。

7. テレビジョン画質における Ψ_a

最後にテレビ画質に関する実験について述べる。放送によく現われる各種の画材をよく代表する 16 種のスライド写真をビジコンに入れ、2 つの模擬伝送系を経て、2 つのモニター A, B に送り、被験者には 2 つの画質を見くらべてもらう。一方の伝送系は、普通の場合、最良の条件にセットし、他方の伝送系にはノイズ、エコーの導入、周波数帯域の変化など、いろいろの変容を加える。

判断は、まず、いずれの画像がより美しいかを指摘し、次にその相違の大きさを、1, 2, 3 の数字で表わし、さらに、それがテレビ画像としてさしつかえない程度の画質の劣化であるかどうかを答えるのである。こういう被験者の判断を処理するに当り、次の 2 つの点に特色をもつ方法が用いられた¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾。

第一に、画質のように内容の複雑な判断においては、判断の規準、観点が人によりまちまちで、判断者の間には定性的な個人差があるかも知れないので、まず、全判断者が定性的に同一の観点から画質を見ているか否かを客観的にチェックする方法がとられた。その結果、被験者の中には、批判的に画像を見つけているテレビ技術者も、家庭婦人のような純然たる素人も入っていたのであるが、第 1 回の実験では 7 人、第 2 回の実験では 5 人の全員を通して、誰もが定性的には同じ判断規準を用いていると認められたので、この全員に共通な規準を X で表わすことにする。

すなわち、各人の判断規準からこの 1 つの共通成分 X をとり除くと、後には各人に固有な見方のくせ、personal noise とも呼ばれるものしか残らないのである。

第二に、モニター A, B の画質の差の大きさは 1, 2, 3 などの数字で判断されているが、どのくらいの大きさの差を 1 と呼び、どのくらいの大きさの差を 2 と呼ぶなど、数字の用い方は、当然、判断者によりまちまちであ

るに違いない。これを量的な個人差と呼べば、共通成分 X の上のどの位置を占める画質にどれだけの確率でどの数字を与えるかを表わす判断の特性曲線 (characteristic curve) を各被験者ごとに構成できるので、これを通じ、各判断者の判断を較正することができ、量的な個人差を調整しながら、全判断者の判断結果を通じ、各画質が X の上で占めるべき位置を最もよい精度でおさえることができた。

すなわち、質的、量的個人差を調整しながら、各人に共通の観点から見た画質の良し悪しを表わす感覚尺度を構成したのであるが、差の判断に立脚したものであるから、以下、これを Ψ_d で示すことにし、 Ψ_d の数値の大きいほど画質が劣化しているものとしよう。

一例として、周波数帯域を圧縮した場合を図 7、デエンファシス回路の振幅特性偏差 m 、中心周波数 f_0 を変化したスメアリング導入の場合を図 8 に示した。図 7 の

図 7 周波数帯域の変化に応ずるテレビ画質の劣化 (L_1 , L_2 はそれぞれ検知限と許容限)

図 8 周波数特性 $\left(\frac{1}{m} \left[m + \frac{\omega}{\omega_0} \left(\frac{1}{m} + \frac{\omega}{\omega_0} \right) \right]^{1/2} \right)$ に応ずるテレビ画質の劣化度 Ψ_d の等高線 (ω : 角周波数, $f_0 = \frac{\pi}{2} \omega_0$)

縦軸は劣化の尺度 Ψ_d 、図 8 は Ψ_d の同じ値の位置をつなげた等高線で、本来、結果は各画材ごとに得られているのであるが、ここでは全画材の結果を平均したものが掲げられている。図中、 L_1 は劣化の検知限、 L_2 は許容限を示し、たとえば、図 7 では、2.2 Mc になって、4 Mc くらい、はじめて劣化が 0.5 の確率で認められ、1.4 Mc になって許容しがたいという判断が 0.5 の確率でおこるようになるのである。

前節までに述べた諸例、すなわち、明暗のしまの知覚や明るさの同一の設定(1)、異なる色調間におけ

る明るさのマッチング(2)、明るさに関する比の判断(3、4)、彩度、明度、色調に関する差と比の判断(5)、などにくらべると、画質の良否の判断は内容が一段と複雑なものであろうが、本節に述べたような形で差の判断に立脚した尺度 Ψ_d を構成することはできるし、また、ある程度の精度で、2つの異なる画質劣化間にマッチングも行なえることが判明した。たとえば、モニター A にスメアリング、B にノイズによる劣化を入れ、両画質が同じ程度と感じられるまで B の SN 比を変化させると、値のばらつきはかなり大きい、平均的には、上述の尺度で、そのスメアリングの Ψ_d と同じ Ψ_d を与える SN 比のところにセットされるのである。

それでは、画質についても一貫性をもつ形で比の判断が行なえるであろうか。筆者は寡聞にして、いまだでそういう実験の行なわれたことを知らない。もし、それが可能であるとしたら、 Ψ_r と Ψ_d との関係は、画質においても、図 3、図 5 に示されるのと同じ形になるであろうことは想像に難くないであろう。

それでは、画質の場合、差の印象と比の印象のいずれがより根元的であろうか。こういう問題は将来の研究をまたなければならぬのである。(昭和 41 年 11 月 2 日受付)

【参考文献】

- 1) 樋波清二、渡部毅、森孝行、長田昌次郎：視覚の空間正弦波レスポンス、NHK 技術研究、16、1 (1964) 38-60
- 2) 森孝行、渡部毅、山口幸也：視覚の空間正弦波レスポンス(2)、NHK 技術研究、18、2 (1966) 79-93
- 3) 森孝行：視覚の伝達関数の問題、心研、35、1 (1964) 37-50
- 4) S.S. Stevens, A.L. Diamond: Effect of glare angle on the brightness function for a small target, Vision Res., 5 (1965) 649-659
- 5) 印東太郎：輝度の加法性について一色彩スケール論 3一、哲学(慶応義塾・三田哲学会発行)、38 (1960) 281-306
- 6) S.G. Yurov: The question of the metrics of brightness, Visual problems of color, A symposium held at the National Physical Laboratory on 23rd, 24th, 25th, September, 1957, Vol. 1, Her Majesty's Stationary Office, London, (1958)
- 7) R.D. Luce, E. Galanter: Discrimination, Handbook of mathematical psychology, Vol. 1, John Wiley & Sons, New York, (1963) 191-243
- 8) S.S. Stevens, J.C. Stevens: The dynamics of visual brightness (未発表原稿, 1960)
- 9) D.L. MacAdam: Visual sensitivities to color differences in daylight, JOSA, 32 (1942) 247-274
- 10) D.L. MacAdam: Specification of small chromaticity differences, JOSA, 33 (1943) 18-26
- 11) W.D. Wright: The sensitivity of the eye to small color differences, Proc. Phys. Soc., 53 (1941) 93-112
- 12) 日置隆一：表色、色彩科学ハンドブック、南江堂 (1962) 71-140
- 13) S.M. Newhall: Preliminary report of the O.S.A. Subcommittee on the spacing of the Munsell colors, JOSA, 30 (1940) 617-645
- 14) S.M. Newhall, D. Nickerson, D.B. Judd: Final report of the O.S.A. Subcommittee on the spacing of the Munsell colors, JOSA, 33 (1943) 385-418
- 15) A.E.O. Munsell, L.L. Sloan, I.H. Godlove: Neutral value scales I, Munsell neutral value scale, JOSA, 23 (1933) 394-418
- 16) W.R. Garner: A technique and a scale for loudness measurement, JASA, 26 (1954) 73-88
- 17) S.S. Stevens: The measurement of loudness, JASA, 27 (1955) 815-829
- 18) T. Indow, S.S. Stevens: Scaling of saturation and hue, Perception & Psychophysics, 1 (1966) 253-271
- 19) 印東太郎：人間の判定の特性曲線とその応用、NHK 技術研究、5、6 (1962) 27-31
- 20) 印東太郎：テレビジョン画質の主観的評価に関する方法的検討、通研研究実用化報告、11、12 (1962) 2181-2204
- 21) 印東太郎、佐々木受、佐藤尚幸：テレビジョン画質の主観的評価に関する方法的検討(第2報)、(未発表 1964)