生理的関数による明度変換関数の近似

正員 重松 征史 (電総研)

Physiological Interpretation of Munsell Value Function

Yukifumi Shigemastu, Member (Electrotechnical Laboratory)

Neural mechanism of the retina may perform the principal role of luminosity transformation.

In this paper, non-linearity of the Munsell value function was discussed on the physiological basis. Amplitude response function of the retinal neurons is approximated as a sigmoidal one $V = V_{\max} \cdot X / (X + S)$. This function may more essentially express the visual process, because it could be shown that this function includes parts well fitting to the well known psychological response functions, Weber-Fechner and Steven's law.

Introducing an idea of neural adaptation to this function, the Munsell value function can be more precisely approximated. The conclusive equations were expressed as $V = V_{\max} \cdot X / \{X + S(X)\}$ and $S(X) = X_0 \{1 + 5.55 \cdot X / (X + 1.8 \cdot X_0)\}$, where X_0 was background light intensity or reflectance, and X was test light one. This equation means that the adaptation level $S(X)$ varied with two components, groval intensity (X_0) and local one (X).

キーワード：測光測色，明度変換関数，マンセル表色系，網膜神経細胞

1. はじめに

視覚情報処理のうちで最も基本的な光刺激強度から感覚量の明度値への変換は、非線形変換として知られている。この変換に関して、視覚系の内部メカニズムから導かれた関数を検討して、新しい変換式を導く。

今まで、光強度の物理測定量と感覚量である明度の関係は、心理実験から導いた Weber-Fechner の対数式、Stevens のべき乗式による変換式が用いられている⁽¹⁾。実際、物体表面の反射率と明度の関係を求める変換式として国際照明委員会 (CIE) では 1/3 乗式、ドイツ工業規格 (DIN) では対数式が使われている⁽²⁾。これらの式は視覚の内部機構とは関係なく、ある一定の心理実験条件の下で成立する近似式として考えられたもので、別の照明条件の下に拡張して使用することは無理で難しい。もし、視覚系の生理的な内部機構から変換式が導かれるならば、より確かなものとなると共に、様々な照明変化による影響も機構に基づいた式の変更に対応でき、幅広い条件の下でも用いることができる可能性がある。

感覚量を生理的な関係に求めたものとして、古くは Cobb らが化学反応の式を用いて心理実験の結果を説明する試みをした例がある⁽³⁾⁽⁴⁾。また、近年には網膜の神経細胞の応答から求められた関係式を用いて明度関数を近似する Seim らの試みもある⁽⁵⁾⁽⁶⁾。ここでは、心理的に求められた明度関数を検討し、網膜の神経生理学の研究成果をもとに視覚系の内部機構に基づいて改良した明度変換関数を提案する。その非線形変換式は今までの関係式よりも、計算が簡単である上に精度よく明度が求められるなど、幾つかの長所があることがわかった。

2. 心理的な明度尺度

ここでは心理実験により得られた物体色の反射率と明度の関係を取上げ、光強度と感覚量の非線形変換の関係を考察する。今までに明度尺度として提案され使われているものとして、CIE の明度関数、DIN の明度関数がある。それらの関係式を反射率 $R (R=0 \sim 100 \%)$ と明度 $V (V=0 \sim 10)$ として示すと、次の式になる⁽²⁾。

$$V=2.5 \cdot R^{1/3}-1.6 \cdots \cdots (1)$$

$$V=6.1723 \cdot \log(40.7 \cdot R/R_0+1) \cdots \cdots (2)$$

ただし、 R_0 は白色の反射率 100 % とする。

(1) 式はべき乗式、(2) 式は対数式の形をとっている。これらは非線形な変換式で、反射率 R から明度値 V への変換は、反射率の低い部分が詳しく高い部分が圧縮したように尺度化されている。また、(1) 式のもととなった修正マンセル表色系の変換式は、次の実験式である⁽²⁾。

$$\begin{aligned} 100(R/R_0) = & 1.2219 V - 0.23111 V^2 \\ & + 0.23951 V^3 - 0.021009 V^4 \\ & + 0.0008404 V^5 \cdots \cdots (3) \end{aligned}$$

この明度尺度を求めた実験条件は、背景として中間の明度 ($V=5$, $R=19.77\%$) をとり標準光源 C の下で、灰色色表を比較測定した。この (3) 式は世界で広く使われているマンセル表色系の基礎的な関係式である。図 1 にその反射率と明度の変換をグラフに示す。それによると反射率約 20 % で中間の明度 5 になっていることがわかる。ただ、この式は日常使用するには複雑すぎるうえ、反射率から明度を求めることができない。そこで、Ladd らは、べき乗式と対数式で (3) 式を近似して次の式を出している⁽⁷⁾。

$$V = -1.324 + 2.217 \cdot R^{0.3520} \cdots \cdots (4)$$

$$V = -1.636 + 2.468 \cdot R^{1/3} \cdots \cdots (5)$$

$$V = -0.388 + 4.505 \cdot \log R \cdots \cdots (6)$$

この中で (4) 式は近似度が非常に良く、明度 1 から 10 の間で (3) 式からの明度の誤差が 0.05 以下、標準偏差が 0.018 になった。対数式 (6) は明度が 1 または

図 1 マンセルの明度変換式 (3) による
反射率と明度の関係

Fig. 1. Characteristics of the Munsell value function.

10 付近で誤差が 1.0 以上、標準偏差が 0.55 と大きく近似度が悪くて使えなかった。また、(5) 式は明度誤差 0.085 以下標準偏差 0.037 と (4) 式より少し精度が落ちるが、近似度は良く、係数を単純化して (1) 式の CIE の明度の尺度として採用することとなった。

実際には明度は測定条件に大に関係しており、明るい背景で測定すると明度は低くなり、暗い背景では明度は高くなる傾向がある。従って、実験条件がどのレベルの明るさを背景にして観察するかでも、明度への変換が異なる。(1) 式と (2) 式でも、それぞれの成立の違いや心理実験の条件の違いから、両者の変換の数値はかならずしも一致しない。これらのことから、適切な明度尺度の変換式を状況に応じて選択しなければならない。

しかし、日常生活をしているときには、ある平均的な明るさレベルに順応した目で、視野内に配置された諸々の明るさの物体を見て、その物体がどんな明度の物体であるかを判断する。このことから中間の灰色 ($V=5$) を背景色としたマンセル表色系の観測条件に近い状態で判断をしているものと思われる。物体色の表記にもマンセル表色が一般的に使われている。また CIE で、 x, y 色度図空間よりも知覚的にほぼ均等な歩度をもつ表色系として示された均等色空間の明るさ表記にも (1) 式の変形式が用いられている。以上のことから、必理実験より実際に即して求められた (3) 式を今後、光強度・明るさ変換の標準となる関係式と考えることにする。

3. 神経活動の非線形応答

脊椎動物の網膜には図 2 に示すように、視細胞 (すい体・桿体)、水平細胞、双極細胞、アマクリン細胞、ガングリオン細胞の五種類の主な神経細胞がある⁽⁸⁾。

R: 視細胞, H: 水平細胞, B: 双極細胞, A: アマクリン細胞, G: ガングリオン細胞

図 2 網膜神経機構の模式図

Fig. 2. Schematic diagram of the retinal neural cells.

視細胞は光刺激を受けて神経活動電位に変換する。水平細胞は視細胞からの入力を受けて空間的に広い範囲の情報集積をして、視細胞・双極細胞に帰還または出力する。双極細胞は視細胞・水平細胞から入力を受け、中心・周辺が拮抗する受容野をつくり、アマクリン細胞・ガングリオン細胞に出力する。アマクリン細胞は時間微分の機能などをして、出力のガングリオン細胞からインパルスとして視覚信号を送り出す。網膜細胞の活動電位は、出力のインパルス以外は連続的な緩電位応答であり、この神経回路網における情報処理は超並列の非線形処理がされている。

光刺激が目に入ると網膜の視細胞内にある色素に吸収され、神経の活動電位が引き起こされる。そこで、入射光強度と網膜細胞の応答の関係を生理学実験の結果から求められた変換式で示し、その特性を検討する。

Naka らは水平細胞の光強度 I と応答電位 V は、次の関係で記述出来ることを示した⁽⁹⁾。

$$V = V_{\max} \frac{I^n}{I^n + \sigma^n} \quad (7)$$

ただし、 $V_{\max}$ ：応答の最大値、 σ ：応答が1/2になる I の値、 n ：定数

Baylor らも、カメの視細胞にフラッシュ光を与え、その光強度と活動電位のピーク値から同様の式を得た。定数 n としては一般的に0.5から0.7の値が得られている⁽¹⁰⁾。

一方、視物質の光による退色・再生過程から導かれる化学反応式⁽¹¹⁾や、視細胞の等価回路から導かれる式⁽¹⁰⁾では、

$$V = V_{\max} \frac{I}{I + \sigma} \quad (8)$$

のように(7)式と同じ形の式であるが、 $n=1$ として求められる。このように視物質の化学反応の式や細胞の等価回路モデルでは $n=1$ となるのに対して、実験結果には $n < 1$ でよくあてはまる。この違いはどうして生じるのだろうか。この問題については後で検討する。

光強度と応答の関係(7)、(8)式は視細胞・水平細胞以外の網膜の神経細胞でも認められるもので、非線形変換を記述する基本的な式と考えられる。この生理学的な非線形変換式は、入力 I が0から無限大に変化するとき、出力 V は0から $V_{\max}$ の間に圧縮された出力を出す連続関数である。また図3に示すように横軸に $\log(I)$ を取る片対数のグラフでは、S字形の曲線となる。このことから(7)、(8)式を今後S字関数と呼ぶ。S字関数の曲線の中央部における直線に近い部分は I と V が対数関係になることを示し、感

片対数グラフではS字形の曲線となる。

図3 生理的変換式(7)、(8)の入出力変換特性
Fig. 3. Semilogarithmic graph of the sigmoidal functions (7) and (8).

図4 S字関数による変換が多段にされる場合の概念図

Fig. 4. Diagram of multitransformation by the sigmoidal function.

覚量が対数式で近似されることを表している。定数 σ は V が $V_{\max}$ の1/2となる I の値を意味する。すい体視細胞や水平細胞では、背景光が増すと、しばらくして応答のS字曲線が図3の破線のように右にシフトしてより強い光レベルに応答するようになる⁽¹²⁾。これは(7)式の S が背景光の強さに応じて大きくなるように順応したとも解釈できる。このことにより背景光の明るさに応じて感度を調節して、環境の変化に適応が出来る機構が備わっていると考えられる。実験により導かれる応答の関係式では(7)式の n は0.5から0.7付近の値をとり、図3の点線のように傾斜が緩やかとなる。

ここで、S字関数のもつ特性の幾つかを調べてみる。まず、図4に示すように多段変換が行われた場合を考える。これは例えば、視細胞でS字形曲線の非線形変換が行われ、更に水平細胞でも同じ非線形変換が行われて、水平細胞の応答はそれらの結果を見ていることに相当する。ここで、一段目の入力を X 、出力を Y 、二段目の入力を Y 、出力を Z とすると、

$$Y = \frac{X^n}{X^n + \sigma_1^n} \quad (9)$$

$$Z = \frac{Y^m}{Y^m + \sigma_2^m} \quad (10)$$

で表され、(9)式を(10)式に代入して整理すると、

$$Z = \frac{(X^n)^m}{(X^n)^m + \sigma_2^m (X^n + \sigma_1^n)^m} \quad (11)$$

となる。この式は σ が σ_2 の $(X^n + \sigma_1^n)$ 倍に変わることを示している。

ここで、二段目の変換が細胞の等価回路による変換式(8)式に従うと仮定して、 $m=1$ とすると(11)式は

$$Z = \frac{1}{1 + \sigma_2} \frac{X^n}{X^n + \sigma} \dots\dots\dots (12)$$

ただし、

$$\sigma = \frac{\sigma_2 \sigma_1^n}{1 + \sigma_2}$$

となる。この(12)式は(9)式と比べると同じ形をしておりS字関数の形を保っている。すなわち、S字関数の変換が多段階にされても、後段階の変換で $m=1$ の条件が満たされていると、一段目の変換の形が保たれてS字関数となる。従って、複数段の変換を経たあとの応答と考えられる水平細胞の応答も同じS字関数で記述されても別に不思議ではない。

次に、S字関数が光強度変化の広い範囲にわたっての応答を表す式であり、心理実験式はその一部として包含されることを示す。心理学実験より求められた明るさの変換式は、べき乗式や対数式がある。これらの式とS字関数の関係を検討してみる。まず光刺激の強度 X が σ と比べて小さい場合($X \ll \sigma$)には(9)式は、

$$Y = \frac{(X/\sigma)^n}{1 + (X/\sigma)^n} \approx \left(\frac{X}{\sigma}\right)^n - \left(\frac{X}{\sigma}\right)^{2n} \dots\dots (13)$$

となり、この式は (X/σ) のべき乗式を表している。次に、 X が σ に近い値すなわち曲線の中心の近くのときは(9)式を変形して、

$$Y = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{(X/\sigma)^{n/2} - (X/\sigma)^{-n/2}}{(X/\sigma)^{n/2} + (X/\sigma)^{-n/2}} \\ = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \tanh \left\{ \frac{n}{2} \ln \left(\frac{X}{\sigma} \right) \right\} \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 $\tanh W$ の級数展開は、

$$\tanh W = W - \frac{1}{3} W^3 + \frac{2}{15} W^5 - \frac{17}{315} W^7 + \dots$$

であり、 X/σ は1に近いので $W = \ln(X/\sigma) \ll 1$ となり級数展開の第1項までをとると、

$$Y \approx \frac{1}{2} + \frac{n}{4} \ln \left(\frac{X}{\sigma} \right) \dots\dots\dots (15)$$

となる。この式は平均レベルの明るさに順応した目で見えた明度を関係づける対数式を表している。最後に X が σ より大きい場合には(9)式は、

$$Y = \frac{1}{1 + (\sigma/X)^n} \approx 1 - \left(\frac{\sigma}{X} \right)^n \dots\dots\dots (16)$$

となり、1を最大値とする飽和特性を表している。

以上のことから、生理学的に導かれたS字関数は心理的なべき乗式・対数式の性質をS字曲線のそれぞ

れの部分に包括し、光刺激から神経細胞の応答への非線形変換を広範囲に関連づける式であることがわかった。

4. 明度尺度の近似

心理的な明度尺度で述べたように、物体色の反射の光強度から明度への変換はマンセルの明度尺度を標準にすることにする。その基になる式として(3)式を取り、それぞれの近似式がどんな意味をもち精度良く近似できるかを考える。

べき乗式や対数式の近似式は、視覚の内部機構とは関連はなく求められたものである。ここでは、神経活動と関連づく生理学的変換の(7)または(8)式で近似することを考える。もし、内部機構に基づいたこのような変換式で近似できれば、視野や照明条件などが変化したときにも、その変換式の形から視覚の機構に基づく環境の変化に応じた係数の変化を取入れ、広い応用ができる可能性が期待できる。

ここでは(7)、(8)式の入射光 I は物体色の場合、光源からの光強度 I_0 と反射率 R との積で $I = RI_0$ であるので、照度が一定な条件下での明度変換には I を R に置き換えて用いることにする。まず、単純な(8)式そのままの形で近似することを試みた。しかし、明度値で0.5くらいの誤差が生じて、精度の良い近似は得られなかった。次に、(7)式による近似を試みると、次の式が得られた⁽⁵⁾。

$$V = 22 \frac{R^{0.6}}{R^{0.6} + 20} \dots\dots\dots (17)$$

この近似度は明度差で0.2以下、標準偏差0.085でCIEの(1)式にほぼ四敵する結果が得られた。図5にCIEの(1)式とその基になった(5)式とここで求めた(17)式それぞれの標準とした(3)式からの明度の誤差をグラフで示す。グラフから見ても、(17)式はまだ満足できる近似とは言えない。これは反射率が低いとこ

図5 近似式(1)、(5)、(17)による明度値の(3)式からの誤差

Fig. 5. Value error from Eq. (3) among Eqs. (1), (5) and (17).

ろに無理に合せようとすると、高いところの誤差が大きくなるため近似は良くなかった。

一方、Seim らは、(7)式を明度関数に適合するように少し変形した形で近似度を高めた次の式を提案した⁽⁶⁾。

$$V=40 \frac{(R-0.43)^{0.51}}{\{(R-0.43)^{0.51}+31.75\}} \dots\dots\dots (18)$$

ただし、 $R>0.43$

この(18)式では、明度差で0.08以下、標準偏差が0.035となり(5)式と同じ良い近似が得られた。ただ、この式は生理学的な意味をもつ変換式であるけれども、反射率が0.43%以下では用いることができない欠点をもっている。また $n=0.51$ となることへの根拠が明らかでない。

そこで、化学反応などからも説明のつく $n=1$ の(8)式を修正して視細胞の応答や明度関数にもうまく近似できる方法を示す。(7)式でもって n が1より小さいということは、S字形の曲線の傾斜が緩やかであることを意味する。一方、図3で示すように、S字関数は背景光の順応レベルにより σ が変化して、順応レベルに合わせるように感度を変化することが知られている。そのことから σ の値の変化が背景光による順応レベルの調整のための変化だけでなく、注視している点からのテスト光刺激によっても影響を受けると考える。この仮定の下に、 σ が背景と注視部分双方の関数として変化する次の明度変換式を新たに提案する。

$$V=20 \frac{R}{R+\sigma(R)} \dots\dots\dots (19)$$

ただし、

$$\sigma(R)=R_s \left(1+5.55 \frac{R}{R+1.8R_s}\right)$$

R_s : 平均レベルの反射率(=20)とする

この式で $\sigma(R)$ の第1項は(8)式の σ と同じ意味もち背景部分の影響を示す。 $\sigma(R)$ の第2項が局所的な注視部分からの影響により σ が変化する部分となる。すなわち、測定点からの反射光が増すに従い $\sigma(R)$ を次第に大きくするように働き、応答 V の増加を抑制する。従って、S字形曲線の傾きを緩やかにして、見掛け上 n が1より小さくなると説明づけられる。この(19)式の明度変換式(3)との近似度は明度差が0.05以下で標準偏差が0.024となり、(18)式より更に良くなった。また、この式は反射率 R が0%から意味をもつ長所を備えている。以上のことから、新しく提案した(19)式の明度変換式は、計算が簡単であると共に生理学的にも説明がつきやすく、非常に良い近似式であることがわかった。

図6 近似式(4)、(18)、(19)、(20)による明度値の(3)式からの誤差

Fig. 6. Value error from Eq. (3) among Eqs. (4), (18), (19) and (20).

表1 各近似式の明度値の(3)式からの誤差と標準偏差

Table 1. Maximum value error and standard deviation of value equations from Eq. (3).

近 似 式	最大誤差	標準偏差
(1) CIE の式	0.173	0.127
(4) Ladd らの式	0.047	0.018
(5) Ladd らの式	0.085	0.037
(17) $n=0.6$ の式	0.191	0.085
(18) Seim らの式	0.080	0.035
(19) 提案する式	0.054	0.024
(20) 提案する式	0.024	0.0096

(19)式と同じ形で更に近似度が良い式としては次の係数の式が見いだされた。

$$V=18.51 \frac{R}{R+\sigma(R)} \dots\dots\dots (20)$$

ただし、

$$\sigma(R)=17.58 \left(1+5.146 \frac{R}{R+30.07}\right)$$

これは今まで提案されたとの式よりも近似度が良く、明度差で0.025以下、標準偏差で0.0096となった。

これまでに得られた近似度の良い(4)、(18)、(19)、(20)式の明度値の(3)式からの誤差を図6に示す。(4)、(18)式と比べて、(18)、(19)式は0から定義される連続関数で近似度も良いことがわかる。

ここで、いままでに比較したそれぞれの近似式がもつ明度値が(3)式の明度値から外れた誤差の最大値と標準偏差をまとめて表1に示す。明度値が小さいところでは(1)、(4)、(5)、(18)式は定義できないので、計算は明度1から10までの範囲において明度を0.5刻みで行った。(1)式の誤差、標準偏差が大きいの、明度値が小さいところで誤差をできるだけ小さくするようにむりに合せたため、それでなければ(5)式とほぼ同じ程度である。

5. 変換式と網膜神経細胞

S 字形関数について化学反応との関係で少し検討を加える。付録に示すように、薬物の単純な可逆反応式(付3)式では、べき乗数 n は 1 以上の整数となる。そのため n が 1 よりも小さい値になるためには、別の理由を考えなければならない。実際に生体内のように複雑な系の中では単純な反応でないために n が 1 よりも小さくなるとも考えられる。一方、(付4)式に見られるように、 n の変化以外に σ の変化によることも考えられる。ここで求めた(19)式と(付4)式を比較してみると、形のうえで非常に似ていることがわかる。 σ の第2項と B/K_0 の項が等しいとすると同じ形になる。この項は(付4)式では競合物質の影響によるものであり、(19)式では反応の結果が帰還されて競合することからくる抑制作用と考えたと説明がつく。

次に、(19)式と網膜の神経細胞の働きの関係を見てみる。視細胞は光刺激を受けて、神経活動に基づいた視覚情報を発現する。そして、そのときの応答が S 字形関数で示される非線形な変換となる。このとき(19)式の σ が局所的な要素と全体的な要素により変化する。局所的な要素としては、すい体視細胞の応答で強い光の後では感度が抑えられることから視細胞自身にも σ を変化する局所的な負帰還の機構があると考えられる。

全体的な背景光の情報を集積する要素としては、水平細胞の働きが考えられる。すなわち、水平細胞は視細胞からの入力を受け、横方向の広い神経結合が発達して空間的に非常に広い範囲の情報を集積する⁽¹³⁾。そして、視細胞と双極細胞に出力を出す。このことは水平細胞が視野内の広い部分から集積した情報を、視細胞または双極細胞に直接または間接的に帰還出力して、それらの神経で競合的な変調を起こしているとも解釈できる。これらのことが σ の背景光の影響による変化部分を作り出す。

従って、(19)式のように σ を空間的な入力により制御しながら情報を取入れ、明度変換する機能は視細胞・水平細胞・双極細胞の神経細胞間で行う重要な視覚の情報処理の一つと思われる。

このようにして変換された明度の情報は更に双極細胞・ガングリオン細胞を経て視覚の中枢に伝えられ知覚される。複雑な背景の場合にまで明度の知覚が、網膜の細胞ですべて処理されているとは言えないが、入力の明度変換のようなごく基本的な部分は末梢の感覚系でかなりの処理がされて中枢に伝えられていると考えられる。

次に観察条件の異なる場合を考える。(19)式では R_0 を背景の平均反射率と考えて $R_0=20$ としているが、これはマンセル色表系では背景の灰色が明度 5、反射率 19.77% とする測定条件に合せてある。背景の反射率がいろいろ変わった場合の明度関数の変化する傾向について、Judd によると⁽¹⁴⁾

$$V = \frac{10R}{R+R_0} \left(1 + \frac{R_0}{100} \right) \dots\dots\dots (21)$$

が提案されている。この式は背景の反射率が高い場合にはテスト色票の明度値は全体的に低くなり、背景の反射率が低い場合には色票の明度は高くなる視覚の特性をおおまかに示している。

(19)式においては R_0 に背景の反射率を代入して、最大値が 10 になるよう規格化することで適応できる。そのことは(21)式の R_0 を $\sigma(R)$ と置き換えることと等価であり、背景が中間の灰色と異なる場合にも対応できるものと思われる。ただし、(19)式では σ が R_0 のみでなく R にも関係するので背景の変化の影響は(21)式よりは穏やかな効果となる。

また、照明光 I_0 と目に入射するテスト光 I 、背景光 I_0 の関係は $I=RI_0$ 、 $I_0=R_0I_0$ であり、照度一定の条件から近似式では I 、 I_0 の代わりに R 、 R_0 を置いて検討してきた。いま照明の強度が変化する場合、(19)式に R 、 R_0 の代わりに I 、 I_0 を代入して整理すると、(19)式は相対的な関係式であるため I_0 に関係なく明度値は変わらない。これは照度の変化に対して明るさの恒常性の性質を示している。更に、測定するものが蛍光面や発光光源のような場合にも反射率 R 、 R_0 の代わりに入射光 I 、 I_0 を用いて計算する。このとき、背景光に比べてより強い発光面の場合には、明度値 V は 10 よりも大きい値と計算される。マンセル明度では明度値 10 以上の定義はされていないが、(19)式ではそのときにも連続的に定義できるので、輝いた発光面の知覚を測定する評価関数としても(19)式が考えられるのではないだろうか。

6. ま と め

視覚の基本的な明度変換関数であるマンセルの明度関数を、生理学的な神経の内部機構から導かれる関数を用いてより良く近似することができた。

それは視覚神経細胞がもつ特異な非線形変換を示す式を、神経系の内部機構を考慮しながら適用し、明度変換に最も適した係数を求めることにより実現した。特に、個々の神経細胞が既に一つのシステムとして働き、外界からの刺激に対して自己の感度を調整する機能をもち、それらが統合して全体としての機能を発揮

するという考え方を取入れることにより可能となった。更に、このことから今まで説明がつかなかった生理実験から得られる結果にあてはまる変換式がどうして n 乗項が 1 よりも小さい値となるかという疑問を解くこともできた。

ここで提案した明度変換の修正 S 字形関数の特性を挙げる。

(1) 生理的な実験から導かれた連続的な非線形変換式であり、視細胞や網膜の神経系の特性とも関連づけやすい。

(2) 感度調整に関係する係数 σ は全体的な順応のレベルに合わせて変化し、感度レベルを調整し、照明環境の変化に最も適応した情報を得る。

(3) 係数 σ は、また局所的な刺激によっても変化をして、応答曲線の傾きを小さくすると同じように働き、その結果応答範囲を広げる効果をもたらす。

(4) S 字形関数は心理的に求められたべき乗式や対数式の特性をその一部としてもつより広い範囲を表す関数である。

一般的にはマクロな心理現象を、生理的ミクロな機構で説明づけることは非常に困難である。ここで述べた明度変換のような視覚の基礎的な機能は、初期段階でかなりのことが処理されていて、化学反応式や細胞の応答特性から説明ができると思われる。

今後の課題として、ここで述べた明度変換関数は、心理測定条件として均一な背景の中に小さい色紙を数枚配置したようなごく単純な視野での実験に基づくものであり、実際にはもっと複雑な視野や、照明光の強弱、スペクトル成分の変化などが関係する。従って、実際の複雑な条件の下での明度を決定するにはまだ多くの問題を残している。そのための心理実験も必要であろうし、その実験結果を解釈するためには、空間的な情報を入れたもっと複雑な機構をもったモデル化が必要になると思われる。いま提案した明度変換の機構がそのときの助けになればと願っている。

終りに、本研究は当研究所の旧応用工学研究室で行われたもので、日ごろの御協力をいただいた香取寛二、不破正宏、山田雅弘氏に感謝します。また、まとめるにあたり御指導をいただいた東京工業大学 池田光男教授に感謝いたします。

(平成元年 8 月 23 日受付, 同 2 年 1 月 18 日再受付)

文 献

- (1) J.C. Stevens & W.S. Stevens: "Brightness function, effect of adaptation", *J. Opt. Soc. Am.*, 53, 375 (1963)
- (2) G. Wyszecki & W.S. Stiles: *Color Science*, 2nd. ed., p. 486

- (1982) John Wiley & Sons
- (3) P.W. Cobb: "The effect on foveal vision of bright surroundings-IV", *J. Exptl. Psychol.*, 1, 540 (1916)
- (4) E.Q. Adams, & P.W. Cobb: "The effect on foveal vision of bright (and dark) surroundings-V", *ibid.*, 5, 39 (1922)
- (5) 重松・菅野: 「視覚神経系の変換関数に基づく明度尺度」, 照明学誌, 70, 268 (昭 61-6)
- (6) T. Seim & A. Valberg: "Towards a uniform color space: A better formula to describe the Munsell and OSA color scales", *Color Res. & Appl.*, 11, 11 (1986)
- (7) J.H. Ladd & J.E. Pinney: "Empirical Relationships with the Munsell Value Scale", *Proc. Inst. Radio Eng.*, 43, 1137 (1955)
- (8) R.F. Miller & M.M. Slaughter: "Excitatory amino acid receptors of the retina: diversity of subtypes and conductance mechanisms", *Trends in Neuro Sciences*, 9, 211 (1986)
- (9) K-I. Naka & W.A.H. Rushton: "S-potential from colour units in the retina of fish (Cyprinidae)", *J. Phys.*, 185, 536 (1966)
- (10) D.A. Baylor & M.G.F. Fuortes: "Electrical responses of single cones in the retina of the turtle", *ibid.*, 207, 77 (1970)
- (11) W.A.H. Rushton & G.H. Henry: "Bleaching and regeneration of cone pigments in man", *Vision Res.*, 8, 617 (1968)
- (12) J.E. Dowling & H. Ripps: "S-potentials in the skate retina", *J. Gen. Physiol.*, 58, 163 (1971)
- (13) Y. Shigematsu & M. Yamada: "Effects of dopamine on spatial properties of horizontal cell responses in the carp retina", *Neuro-science Res.*, S-8, s69 (1988)
- (14) D.B. Judd: *Color in Business, Science and Industry* (1952) John Wiley, New York
- (15) 小岩井, 他訳: 薬物の用量-反応関係 (昭 61) 医歯薬出版

付 録

薬理学的な化学反応の関係式⁽¹⁵⁾は次のように求められる。

A が薬物を, R がその受容体を示し, AR はその複合体を示すとすれば, 薬物と受容体は次のように可逆的な反応をする。

ここで薬物の分子数を A, 受容体の数を r, 複合体 AR の数を Y として, 生成速度 dY/dt は会合と解離の差の関係から,

$$\frac{dY}{dt} = k_1 A(r - X) - k_2 X \dots\dots\dots (付 1)$$

となる。平衡状態のときは $dY/dt = 0$ であるので Y は,

$$Y = \frac{rA}{A + K} \dots\dots\dots (付 2)$$

となる。ただし, K は解離定数で $K = k_2/k_1$ 。

また, 薬物 A の複数の分子 n 個が受容体 R と可逆的に反応する場合には, 同様に平衡状態の関係式は,

$$Y = \frac{rA^n}{A^n + K} \dots\dots\dots(\text{付3})$$

となる。ただし、この式で A のべき乗数 n は整数である。

実際の化学反応ではこのように理想的な条件が満たされないで、整数 n からのばらつきが測定値に含まれる。更に n が整数でない原因としては、上のような単純な反応でなく、その他の別の反応を伴う複雑な反応が考えられる。

一方、薬物 A と薬物 B が互いに競合して受容体 R と可逆反応をする次のような場合を考える。

ここで、 B の分子数を B 、それぞれの解離定数を K_a 、 K_b とすると、平衡状態の AR の数 Y は、

$$Y = \frac{rA}{A + K_a\{1 + (B/K_b)\}} \dots\dots\dots(\text{付4})$$

で表される。

重松 征史 (正員)

昭和40年愛媛大学工学部電気工学科卒業。同年電気試験所(現、電子技術総合研究所)入所、主任研究官。視覚系、特に網膜の神経情報

処理の研究に従事。日本生理学会、電子情報通信学会会員。