網膜における視覚情報の伝送と処理

NHK 放送科学基礎研究所 樋 渡 涸 二

生体のもつすぐれた情報処理機能を学び、そこからヒントを得て何らかの工学装置に応用しようとする学問を、生体工学またはバイオニクスという。ここでは人間や動物の網膜内の視覚情報の伝送と処理方式について、バイオニクスの立場から解説する。

1. ま え が き

テレビを含む画像伝送系や、各種のディスプレイに関する技術は、最終的には視覚に訴えるものであるから、視覚との整合をはかるための視覚の性質に関する研究が重要であることは言をまたない。一方、視覚系そのものは高度の画像伝送処理系であるから、視覚系の内部構造に関する知見は、画像伝送技術に新しい示唆を与えるであろう。そのために、画像技術と視覚系とのアナロジーや、視覚系の工学的なシミュレーションの研究が必要である。一般にこのような生体の現象や、生体内部のメカニズムからヒントを得て、何らかの新しい工学装置を開発しようとする工学は、生体工学またはバイオニクス(Bionics)¹⁾と呼ばれている。

また、視覚系の内部構造に関しては、解剖学、組織学、生理学のほうで研究されており²⁾、一方、心理学では人間の視知覚現象についても全体的な研究が行なわれている³⁾。しかし、人間のいろいろな視知覚現象がいかなる生理機構によっていとなまれているかという、心理学と生理学との対応はまだ充分ついていない段階にある。バイオニクスの立場からは、開発したい機械の仕様は、どちらかといえば心理学的な事実であり、その機械の内部機構は生理学的であるので、神経生理学的な知見を基礎とし、ある種のモデルを構成し、これを解析してその特性が心理的データをも同時に満足するようパラメーターを決定するという研究が、最近工学者の手によって行なわれるようになった。

さて、高等な脊椎動物、特に人間の視

覚系とこれと同等の役割を果たす機械を想定し、この2つを対比せしめると図1のようになる。眼光学系は外景を網膜に結像(幾何光学系)させ、ついで光は錐体内で干渉して波長選別(色の検知)を行なう(物理光学系)。さらに、視細胞内では光→化学→電気の変換が行なわれる。この電気信号は網膜内の複雑な神経回路で処理され、順応、対比などの一種の正規化作用をうける。網膜の出力はパルスであり、情報はパルスの密度変調の形で外側膝状体の中継所を経て、大脳後頭部の視覚領(visual cortex)に送られる。

大脳視覚領では、最近の Hubel と Wiesel によって代表される生理学的研究によれば、視覚パターンを分解し線分、角度、コントラストエッジ、線分の端点、動きなどを検出する。これは一種の特徴抽出作用であると考えられる。このあたりまでは意識や判断と関係なく「知覚」が生ずる系で、「物が見える」働きをする。さらに高次中枢にいたると、記憶や学習の機構が協力し、パターンの識別、判断が行なわれ、ここにおいて初めてパターンの「認識」が可能となる。

本文は、以下この視覚系のうち、いわゆる末梢部とい

図1 視覚系と機械系の対比

"Transmission and Processing of the Visual Information in the Retina" by Kenji Hiwatashi (NHK Broadcasting Science Research Laboratories, Tokyo)

われる網膜に関する問題のみを取扱う。

2. 網膜の構造と生理作用²⁾⁴⁾

図2は人間の網膜の断面を示すよく知られた Polyak の模式図である。上から順に視細胞(受容細胞, receptor cell), 水平細胞 (horizontal cell), 双極細胞 (bipolar cell), アマクリン細胞 (amacrine cell) および神経節細胞 (ganglion cell) の5つの細胞層からなっている。視細胞には錐体細胞 (cone) と杆体細胞 (rod) の2種類があって、それぞれ異なる性質を示すことは衆知のとおりである。

この5つの細胞層のうち、視覚情報の主伝送経路は視細胞 (R.C と略す)——双極細胞 (B.C)——神経節細胞 (G.C) であり、水平細胞 (H.C) とアマクリン細胞 (A.C) は普通の神経細胞(ニューロン)とはいささか性質が異なっており、グリア細胞 (glial cell) であるともいわれているが、後述するような S-電位を生じることから、情報処理に関係していると考えられる向きもある。

2.1 視細胞の光学モデルと視物質の分光分析

視細胞内の光-化学-電気の変換に関する研究は多いがまだわかっていない部分が多い。色に関係のない杆体ではロードプシンなる視物質が発見されているが、錐体では色に対して反応の異なる数種の視物質の存在は発見されていない。

錐体機能のうちで色分析の問題は最も重要なものであるが、錐体はすべて同一構造で色の分析はむしろ物理光学的に行なわれるとする説があり、Single cone theory という。この端緒は網膜に入る光の角度によって感度が異なるという Stiles-Crawford 効果 (1933) を説明するモデルの研究にあった。O'Brien (1946) は細胞内外の屈折率の差と構造から光学モデルを提案し、Torald di Francia (1949) は光の誘電体導波管の概念を用いて説明した。Schroeder (1960)⁵⁾ は実際に導波管モデルを計算

図2 網膜の断面模式図 (Polyak)

1 色素細胞層, 2 錐体と杆体, 4 受容細胞, c 水平細胞
e, d, h などは双極細胞, l アマクリン細胞, m, s などは
神経節細胞

し、錐体外節の適当な位置に色素を配置すれば、色の選別が可能であることを示し、Enoch (1963)⁶⁾ はちょうどガラスファイバーによる導波管に見られるモードパターンを実際の網膜で観測することに成功した。最近ではBirnson, Kinsley (1965)⁷⁾ が導波管モデルについて詳細な計算を行なっている。

一方、視細胞における色分析の測定として、眼底反射光の分光分析がある。Campbell, Rushton (1955) らは人間の眼球に光を入れ、眼底からの反射光を光順応の2過程で分析し、3種の色素 (pigment) の存在を予測している。さらに Marks, Mac Nichol (1963)⁸⁾ は、動物の1個の視細胞から、microspectrophotometry によってその分光分析を行ない、金魚の錐体から 455 ± 5 , 530 ± 5 , $625 \pm 15 \text{ m}\mu$ にピークをもつ3種の分光特性を得た (図3(a))。ごく最近になって富田博士 (1966)⁹⁾ は鯉 (Cyprinus carpio) の網膜の錐体1個からも電気生理学的な方法(微小電極法)により、 611 ± 23 , 529 ± 14 , $462 \pm 15 \text{ m}\mu$ の3種のレスポンスを得ることに成功した (図3(b))。

以上を総合すると、錐体ではいかなるメカニズムによるものであれ、少なくとも3種以上の色分析が行なわれているという事実は確実であろう。

2.2 中間細胞層と S-電位

H.C や A.C を顕微鏡でみると、他の神経細胞よりも形が大きく、その生理的性質は明らかに神経細胞と異なる

(a) ミクロスペクトル分析によるもの (Marks)

(b) 神経生理学的に得られたもの (Tomita)

図3 錐体の分光特性

ることが知られている。従来 H.C や A.C は情報処理に関係なく、神経細胞の間隙を埋め、栄養の補給路である支持細胞(グリア細胞)とされていた。ところが、このあたりの細胞に微小電極を挿入すると、S-電位といわれる緩電位が発生することがわかった(Svaetichin, 1956)¹⁰⁾。S-電位については日本でも本川、富田、御手洗、渡辺などの研究があるが、輝度に反応するL形(luminosity type)と色に関係するC形(chromatisity type)とがあり、後者にはさらにRG形、YB形あるいはRYB形が発見されている(図4)。

2.3 神経節細胞と網膜受容域¹¹⁾

こんどは網膜の出力細胞である G.C に微小電極をさし込み、網膜に与えられた光の刺激に対する反応をみると、1個の G.C に応ずる R.C は数多く、しかもある有限の範囲があることがわかり(Hartline, 1938)、これを受容域(receptive field)という。人間の場合 R.C は約 10^8 個に対し、G.C は約 10^6 個であるから、多くの R.C が1個の G.C に集約されるのは当然であるが、“ねこ”や“さる”などの動物で受容域の性質を調べると、おおよそつぎのことがわかった。

(1) 受容域の形はほぼ円形(動物によっては楕円形その他のものもある)で、その中心部に光スポットをあてるとパルスを出し、(ON 反応)、周辺部にあてると逆に抑制され、光を消したときにパルスを出す(OFF 反応)形(これを on-center field という)と、

図5 2種類の網膜受容域の動作を示す

まったくその逆のもの(これを off center field という)がある(Kuffler, 1953)(図5)。

(2) 円形受容域の大きさは、網膜の中心部(視力の最も高い中心窩付近)が最も小さく、網膜周辺部ほど大きくなる。——網膜上の視力分布に対応——また受容域は互いに密にオーバーラップしている。

(3) 受容域中心部の直径は、平均の順応光が高いほど小さくなり、かつ光をあてた瞬間から次第に時間とともに小さくなる。

以上は白色光の場合であるが、色光に対しては“さる”を用いた実験(de Valois, 1966¹²⁾, Hubel, Wiesel 1966¹³⁾)

によれば(この場合は G.C ではなく L. G. B の出力で観測したもの)、受容域の中心部が赤光に対し ON 反応、周辺部が補色の緑光に対し OFF 反応を呈する形(+R/-G と記す)や、+Y/-B, +G/-R, +B/-Yなどの種類がある(de Valois)。このような実験結果では、網膜出力では Hering の反対色説を支持するレスポンスが得られている。

以上のことから、色に関しては、視細胞のレベルでは R, G, B の三色説が成立し、網膜の神経回路を経るとまず輝度信号、色度信号に分離され、後者は反対色説に従うということになる。この辺の事情はカラーテレビとの類推が成り立つので、きわめて興味深いものがある。

3. 視知覚の時空間特性¹⁴⁾

視知覚に関する心理現象は無数にあって、知覚心理学のほうで整理されているが、一般に心理現象といわれるものは感

(a) 富田によるもの(鮎, 1963)

(b) MacNichol, Svaetichin によるもの(ぼら, 1958)

図4 光の各波長に対する S-電位

図 6 視覚の空間・時間周波数特性

覚器—大脳の総合作用に基づくものであって、特定の部位の働きであるとはできない。しかし視知覚の場合、網膜などの末梢部の性質が支配的に作用していると想像される心理現象を探することは困難ではない。いま白と黒のエッジパターンを目の前に点滅せしめるような単純な刺激に対してひき起こされる各部の明るさの感覚などはその例であろう。いま目の前に

$$B(x, y, t) = \bar{B}\{1 + m f(x, y, t)\} \quad (1)$$

ただし $\bar{B}$ は平均輝度（順応レベル）、 $m = \Delta B / \bar{B}$ 、 ΔB は変調振幅、 f は任意の関数

のような輝度パターン $B(x, y, t)$ を与えたときの感覚 $I(x, y, t)$ を

$$I(x, y, t) = \bar{I}\{1 + m' g(x, y, t)\} \quad (2)$$

とする。いま

$$f(x, y, t) = \begin{cases} 1 (x < 1, y < 1, t \geq 0) \\ 0 (x \geq 1, y \geq 1, t < 0) \end{cases} \quad (3)$$

のような場合には $I(x, y, t)$ はエッジ部分に空間的にも時間的にもオーバーシュートを生じ、空間的にはマッハ効果、時間的には Broca-Sulzer 効果と呼ばれている。このような特性をステップ波の代りに一次元の正弦波、すなわち $f(x, y, t)$ として $\cos 2\pi\nu x$, $\cos 2\pi f t$ (ν は空間周波数、 f は時間周波数) を与え、 $I(x, y, t)$ またはこれに相当する値を測定すれば、視覚の空間周波数特性および時間周波数特性が得られる。普通は測定の便宜上 m' が一定値になるよう m を可変にして測定し、 m の逆数を縦軸にとって感度 (dB) で表示される。この場合、 $f(x, y, t)$ としていろいろの条件のもとで測定されており、たとえば

$$B(x) = \bar{B}(1 + m \cos 2\pi\nu x) \quad \bar{B} \text{ をパラメーターとする} \quad (4)$$

$$B(t) = \bar{B}(1 + m \cos 2\pi f t) \quad " \quad (5)$$

$$B(x, t) = \bar{B}(1 + m \cos 2\pi\nu x) \cdot \delta(t, T) \quad (6)$$

ここに

$$\delta(t, T) = 1 (0 \leq t \leq T), \quad 0 (t > T)$$

で、 T をパラメーターとする。

$$B(x, t) = \bar{B}\{1 + m \cos 2\pi(x - \nu t)\} \quad (7)$$

これは運動パターンの場合で、 ν をパラメーターとする。

$$B(x, t) = \bar{B}(1 + m \cos 2\pi\nu x \cdot \cos 2\pi f t) \quad (8)$$

などの入力刺激に対して測定された視覚の空間周波数特性 $m^{-1}(\nu)$ 、時間周波数特性 $m^{-1}(f)$ の例を図 6 にまとめて示す。この図からつぎのことが結論される。

(1) 入力刺激が (4), (5) 式の場合には、いずれも順応レベル $\bar{B}$ が大なるほど低域の低下がはげしく

なり、LPF→BPF の傾向をもつ。——順応レベルの要因

(2) (6) 式の入力に対しては、提示時間が短くなるほど全体の感度は低下するが、低域低下がなくなる。換言すれば提示時間とともに LPF→BPF の傾向をたどる。(7) 式の入力に対しては速度 ν が増すほど感度が下り、ピーク周波数が低域に移動する——時間的要因

(3) (8) 式の入力に対しては、 $m^{-1}(\nu)$ はパターン輝度のくりかえしが早くなるほど BPF→LPF となる。図 6 には出ていないが、(8) 式に対してえられた $m^{-1}(f)$ の特性はパターンが細くなるほど BPF→LPF の傾向がある。——時空間的要因

4. 網膜の神経回路のモデルと時空間特性

本章では、2 章にのべた網膜の神経生理学的な事実にもとづいて、3 章にのべた心理現象を説明する網膜の神経回路モデルの構成についてのべる。

いま、図 2 のような複雑な回路はあたまわしにして、原始動物“かぶとがに”(Limulus) の視覚系をみると、この目は複眼で、図 7 のような神経系がみられる。これを生理学的に調べると(Ratliff, Hartline 1961¹⁵⁾)、横に結合されている線維は相手側の活動を抑制させる働きがあることがわかった。いま、図 7 をモデル化すると図 8 (a) または (b) の回路が得られる。このような結合を相互抑制 (lateral inhibition) 回路といい、(a) の場合を順方向抑制 (forward inhibition)、(b) の場合を逆方向抑制 (backward inhibition) という。

いま図 8 (a), (b) において、入力空間刺激 $S(x)$ に

図 7 かぶとがにの視覚系

(a) 順方向抑制

(b) 逆方向抑制

図 8 相互抑制回路

(→ は興奮性結合、○ は抑制性結合を示す)

対する応答 $R(x)$ は、系を線形と仮定するとそれぞれ、

$$R(x) = S(x) - \int_{-\infty}^{\infty} S(\xi) G(x - \xi) d\xi \quad (9)$$

$$R(x) = S(x) - \int_{-\infty}^{\infty} R(\xi) G(x - \xi) d\xi \quad (10)$$

となる。ただし $G(x)$ は抑制結合の分布(ここでは図8よりさらに一般的に神経は両隣りのみでなく、ある広い範囲に抑制の手を広げた場合を扱う)を示す。いま仮りに

$$G(x) = \frac{x_0 G_0}{2} \exp\left(-\frac{x_0}{x_1}\right) \quad (11)$$

とすると $S(x)=1$ ($x \geq 0$), 0 ($x < 0$) を与えたときの(9)式による出力波形は図9のようなのである。(10)式の場合には抑制の強さにより空間的振動を呈することが知られている¹⁶⁾。

いま(9), (10)式をフーリエ変換すると、それぞれ

$$\left. \begin{aligned} R^*(\nu) &= S^*(\nu)[1 - G^*(\nu)] \\ R^*(\nu) &= S^*(\nu)/[1 + G^*(\nu)] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

となり、(11)式から

$$G^*(\nu) = G_0 / \{1 + (\nu/\nu_0)^2\} \quad (13)$$

であるから、伝達関数 $R^*(\nu)/S^*(\nu) = H^*(\nu)$ はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} H^*(\nu) &= \frac{(1 - G_0) + (\nu/\nu_0)^2}{1 + (\nu/\nu_0)^2} \\ H^*(\nu) &= \frac{1 + (\nu/\nu_0)^2}{(1 + G_0) + (\nu/\nu_0)^2} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

となる。(14)式はいずれも空間周波数特性における低域の低下を与える。

以上の回路は視覚におけるマッハ効果あるいは対比効果を与える基本形と考えられる。一方、Broca-Sulzer 効果に対する回路としては、図10の神経回路が考えられる¹⁷⁾。この場合に時間周波数特性の低域低下を与えるには、抑制性ニューロン(斜線の入ったもの)の時間特性が

図9 順方向相互抑制回路のステップ応答

図10 自己抑制回路

(a) は順方向
(b) は逆方向

興奮性ニューロンのそれと異なり、長い時定数を考えればよい。この回路も相互抑制の場合と同様に計算でき、ラプラス変換により時間周波数特性が得られる。

以上の2つの基本回路を得たが、これのみにては図7に示す順応光の要因などの非直線の変化の様相は得られない。また、2章にのべた受容域の性質は与えられていない。そこでここでは脊椎動物の網膜を考え、これに上記の基本回路を適用することを考える。図11はON-中心形およびOFF-中心形の受容域を与えるモデルである¹⁸⁾。ここでは入力細胞層(R.Cに相当)と出力細胞層(G.C)に相当との間に中間細胞層を考えた3層の時空間回路を構成したものである。図においてSは一種の直流バイアスで、自発性放電(無刺激時に生ずるランダムパルス)を想定したものである。また一般的には、各素子はそれぞれ時間特性と閾特性をもつ非線形素子である。入力細胞層は中間細胞に対し図示するようなガウス形分布の結合の強さをもつ。中間細胞に2種類を考え、(a)、(b)ではひとつは出力細胞に対し興奮性に、他のひとつは抑制性に結合されている。また(c)、(d)では抑制性の中間細胞は興奮性のその出力を入力細胞層にフィードバックしている。この図はおのおの1個の受容域を構成した図であるが、このエレメントが互いにオーバーラップして網膜全体を構成しているものとする。なおこの図で、斜線で示した抑制性中間細胞は興奮性のそれにくらべ長い時定数と、高い閾値をもつものとする。

このようなモデルにより、生理現象と心理現象とをつぎにのべるように結合させることができる。

(1) 古典法則 目に強さ I 、大きさ S の光点を与えると $IS^n = \text{一定}$ 、 n は S が充分小さいと1 (Ricco の法則)、やや大きくなると $1/2$ (Piper の法則)、さらに大きいと0 (面積効果なし)。これは S がON形受容域の中心部より小さいとき $n=1$ 、大きくなると周囲の抑制がきいてきて $n < 1$ となる。

(2) 視力 視力は一般に順応レベルが上(明るくなる)と上昇する。視力は受容域中心部の直径に対応するものと考え、これは受容域の中心部の直径が順応レベルとともに小さくなることに対応する。これは図11

図 11 網膜受容域を形成する 4 種の結合

(a), (c)において、中間層の抑制素子が興奮素子にくらべて閾値が高くってあるので、順応レベルが低いと抑制素子が出力を出さなくなり、実効的に受容域の ON-反応部の直径が大きくなる。

(3) 視覚の空間周波数特性 視覚の空間周波数特性の高域の低下は、受容域中心部の形で決定され、もしガウス形であれば周波数特性もガウス形となる。低域における低下は受容域周辺部によって生ずる。したがって順応レベルの要因—— $\bar{B}$ が下ると LPF 形となる——については、上記(2)と同じく、順応光レベルが下ると周辺部が反応しなくなるために低域低下が消失し、かつ中心部直径が大きくなるので、高域のカットオフ周波数が低下することになる。

視覚の空間周波数特性の時間の要因については、たとえば正弦波パターンの提示時間が短くなると、図11(a)(c)の抑制素子の時定数が興奮素子のそれより長いためにその出力は充分に立上らない。したがって、特性には受容域周辺部が寄与しないために LPF 形になってしまう。正弦波パターンが運動する場合にも同様の説明ができる。

視覚の時間周波数特性については、高域の低下は興奮素子の時間特性できまり、低域の低下は、抑制素子の時間特性できまる。 $\bar{B}$ が低下すると、前述と同理由で抑制素子が反応しなくなるので LPF 形になる。視覚の周波数特性における時空間の要因についても、だいたい上述と同様に説明できるので省略する。

(4) マッハ効果と同時対比 マッハ効果についてはすでに“かぶとがに”の視覚系のモデルのところでも説明したが、円形受容域によっても同様に説明できる。また、マッハ効果は中心視よりも周辺視のほうがマッハ

バントの幅が大きくなる事実があるが、これも受容域の大きさが周辺ほど大きくなる事実に対応する。

さて、図11における中間層の興奮素子と抑制素子の生理学的対応は何かというと、興奮素子は B.C のような神経細胞に対応し、抑制素子は閾値が高く、かつ時定数が遅いという点が神経細胞と異なる点で、これは H.C または A.C のグリヤ細胞に対応づけることができよう。

5. 色覚のモデル⁴⁾

人間の色覚を網膜の各部位で測定すると、図 12 左のように網膜中心部では 3 色(R, G, B)に感ずるが、若干周辺になると 2 色(B, Y)となり、さらに周辺では色覚がなくなる。これはごく周辺では錐体の数がきわめて少なくなることから当然である。ただ 2 色に感ずる部位の解釈は、ここでは R, G の未分化の状態が Y 細胞と考えておこう。いま、図11(a) (ON-中心形、順方向抑制)の受容域の場合について、その色覚に関する de Valois の生理学データによって拡張したモデルを図 12 (右)に示す。

さて、Kelly¹⁹⁾は視覚の時間周波数特性を特定の被験者で測定し図 13 (a)を得た。この曲線の凸凹については、(b)のように色盲では山の数が減ることから、色に関係あるものとした。事実、目は色に対して時間特性が異なっており、本川²⁾は「法と称する独特の方法によって R, G, B の過程に図 14 にみられる変化があることを示した。すなわち、色覚の発生は R が最も早く、ついで G, B の順で遅くなる。このような色による時間特性は図 12 (b)のモデルではそれぞれの素子に異なる時間特性を与えればよい。

6. 図形知覚のモデル

人間の視知覚は、対象の物理的性質とは異なる性質を示す。空間図形の知覚においては錯視(illusion)²⁰⁾があり実際の図形の物理的長さ、大きさ、形などが図形をとりまく周囲の状態によって異なるものに知覚される。また時空間的図形においても、たとえば異なる場所に 2 つの光点 A, B が継時的に提示される場合、2 点間の空間的距離がある適当な値のときに光点 A が B の位置に動いたように見え(仮現運動, apparent movement), また A, B 間の距離や A, B 間の時間的間隔が実際より長

図 12 視野と色覚(a) および色に関する受容域モデル(b)

(a) は Foundation of Psychology, by E. G. Boring, et al (eds.), New York (1948) p.287 による

図 13 視覚の時間周波数特性 (Kelly)

図 14 人の網膜の色過程 (本川)

くあるいは短く感じ (τ -s 効果), また, 図形が目前に提示された瞬間, それが実際より大きく見えたり小さく見えたり (図形残効), さらに一定速度で一方向に運動して

いるかに見える (運動残像) などの現象がある。この種の一連の視知覚現象のメカニズムについては, わかっていないところが多いが, 網膜に刺激が与えられると, そのまわりに一種の生理的なポテンシャルフィールドが生じ, このフィールドの時空間的な挙動が上記のような種々の視知覚現象を生むらしいというのが定説である。このフィールドは網膜誘導場²⁾とか感応の場³⁾とか呼ばれている。

ところが種々の実験から, このフィールドの広がりには1個の受容域の大きさに比しはるかに広い部位に広がるということがわかっていく。したがって, これまでのべた神経回路モデルのみでは, 上記のような時空間的な図形知覚の性質を説明することができない。

いま, 網膜内の神経組織に再び目を転じると, H. C や A. C はかなり水平に大きく広がっており, 特に A. C は互いに手をつないでいるらしいことが組織学的にわかってきている。しかも, この辺から光に反応する S-電位も出ているかに思われ, 事実はおおべろにとざされているとしても, われわれ工学者としては目をつけたいところで, H. C や A. C のモデルを構成する必要を感じる。図 15 は Dowling と Boycott²⁰⁾ が顕微鏡所見から推定した網膜神経回路のモデルである。このモデルはかなり微細な構造をはっきり示しているが, 生理学的に何ら証明されていないので, このまま信用することは危険であるが, 上記の図形知覚現象を説明できる可能性を含ん

図 15 網膜の5層モデル (Dowling & Boycott)

でいることに着目したい。

7. む す び

網膜内の生理学的現象と、網膜が主な原因となっていると予想される心理現象の二、三を説明し、この2つを結ぶモデルのいくつかを紹介した。最近、このようなモデルの研究を工学者が行なうようになってきているが、さらにこのような研究が進むと、ひとつには生理学や心理学のような生体に関する基礎科学の促進剤となり、他方においては、いままで考えられなかった視覚情報のディスプレイや処理に関するデバイスに何らかの応用面が見出されると思われる。

(昭和42年11月4日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 南雲編：バイオニクス，情報科学講座，B9-1，共立出版（1966）
- 2) たとえば本川：大脳生理学，中山書店（1964）
- 3) たとえば高木，城戸監修：実験心理学提要，第2巻，岩波書店（1952），小保内：視知覚，中山書店（1955）
- 4) 樋渡：色覚とそのモデル，NHK 技研月報，10，2（1967）64
- 5) A. C. Schroeder: Theory on the Receptor Mechanism in Color Vision, JOSA, 56（1960）945

- 6) J. M. Enoch: Optical Properties of the Retinal Receptors, JOSA, 53（1963）71
- 7) G. Biernson and D. J. Kinsley: Generalized Plots of Mode Patterns in a Cylindrical Dielectric Waveguide Applied to Retinal Cones, Proc. IEEE, Trans. MTT, 13（1965）345
- 8) E. F. Mac Nichol, Jr.: Retinal Processing of Visual Data, Proc. Nat. Acad. Sci., 55, 6（1966）1332
- 9) T. Tomita et al: Spectral Response Curve of Single Cones in the Carp, Vis. Res., 7（1967）519
- 10) G. Svaetichin: Spectral Response from Single Cones, Acta. Physiol. Scand., Suppl., 39, 134（1956）17
Mac Nichol: Retinal Mechanisms of Color Vision, Vis. Res., 4（1964）119
あるいは渡辺：S電位序説，生体の科学，15，5（1964）234
- 11) D. H. Hubel: The Visual Cortex of the Brain, Scie. Amer., 209, 5（1963）54; R. W. Rodieck and J. Stone: Response of Cat Retinal Ganglion Cells to Moving Visual Patterns, J. Neurophysiol., 28（1965）819
- 12) R. L. de Valois, et al: Analysis of Response Patterns of LGN Cells, JOSA, 56, 7（1966）966
- 13) T. N. Wiesel and D. H. Hubel: Spatial and Chromatic Interactions in the Lateral Geniculate Body of the Rhesus Monkey, J. Neurophysiol., 29, 6（1966）1115
- 14) 樋渡，渡部，森，長田：視覚の空間正弦波レスポンス，NHK 技術研究，16（1964）38; 森，渡部，山口：同上（2），NHK 技術研究，18（1966）79，あるいは渡部：視覚の空間周波数特性，テレビ誌，20，11（1966）730
- 15) F. Ratliff, H. K. Hartline and W. H. Miller: Spatial and Temporal Aspects of Retinal Inhibition Interaction, JOSA, 53（1963）110
- 16) この回路の理論的研究はきわめて多いが，たとえば，W. Reichardt and G. M. Ginitie: Zur Theorie der Lateral Inhibition, Kybernetik, 1（1962）155，あるいは D. Varji: Vergleich zweier Modelle für Lateral Inhibition, Kybernetik, 1（1962）200
- 17) 樋渡，長田：視覚現象の電子回路によるシミュレーション，NHK 技術研究，18（1965）117
- 18) 安田，樋渡：網膜神経回路のモデルと時空間特性，日本 ME 誌（投稿中）
- 19) D. H. Kelly: Visual Responses to Time-dependent Stimulus, JOSA, 52, 4（1961）422
- 20) J. E. Dowling and B. B. Boycott: Organization of the Primate Retina; Electron Microscopy, Proc. Roy. Soc., B, 166（1966）80

社団法人 テレビジョン学会 編

カラーテレビジョン技術

A 5 判
263 頁

概論／色彩論／カラーテレビジョン方式の原理／日本のカラーテレビジョン標準方式／送像装置／中継および送信装置／受像管／受像機／測定器および測定法／カラーテレビジョンの産業応用

定 価 1,200 円（テレビジョン学会・電子通信学会の会員は1割引）

申込先 テレビジョン学会事務局（東京都港区芝公園21号地 機械振興会館内）