

脳が見る—視覚認識の脳内過程

藤田 一郎 (大阪大学医学部認知脳科学講座)

私たちや動物たちが、外界世界を見るとき、光はまず網膜へ到着し、視細胞によって細胞の電気信号へと翻訳されます。どのような化学物質や反応が、この過程に関わって、光の持つ物理的エネルギーが生体内信号に変換されるのかを、皆さんは、このシンポジウムの他の講演者からお聞きになるでしょう。でも、これは、「ものを見る」ことの背景で起きているできごとのほんの始まりです。ふだん、私たちは、風景や人や物を何気なく眺めていますが、その際、脳が利用している網膜からの視覚情報というのは、まったく不十分で、物体像を復元するための本質的な情報を欠いています。脳は、しかし、とても不思議なそしてすばらしいメカニズムによって、この不完全な情報から物体像を再構築しています。

たとえば、次のようなことを考えてみると、脳が行っていることの何をもって、私が、不思議だとかすばらしいとか言っているのかがおわかりになるでしょう。網膜の視細胞は、眼球の奥の一つの平面に並んでいます。すなわち、外界の3次元世界は、網膜の上に、奥行きのない2次元の像として投影されています。一つ一つの視細胞が脳に伝える情報は、視野内のごく狭い範囲における光の波長と強さの変化の仕方だけです。個々の視細胞は、自分が受けた光の情報がどのような距離から来たのかを伝えることはできません。これは、とても困ったことを引き起こします。というのは、同一の2次元網膜画像を与える3次元構造は無数にあるからです(図9)。また、一つの物体であっても、照明や視線位置や距離や他の物体による遮蔽など、その置かれた条件によって、いかなる網膜画像をも作りだすからです。私たちが生まれてから死ぬまでの間、網膜上の光の分布が同一である瞬間がくりかえされることなど、一度もありません。このような情報を基礎にしながら、脳は、物体像を一意的に再現し、しかも、同じ物を見たときには違った視覚像であっても同じ物であることがわかるのです。

中学や高校で一次連立方程式というものを習います。XとYという2つの未知数を、2つの方程式から求めようというものです。未知数がX, Y, Zと3つあれば、3つの方程式が必要で、2つしか方程式がなければ、その答えを一組の数に定めることができません。ところが、脳は、まさに、これを行っています。網膜上の2次元画像から物体の3次元構造を再現しているのですから。もうこれで明らかだと思いますが、ものを見るということは、カメラのフィルムに像が写るといような単純なことではありません

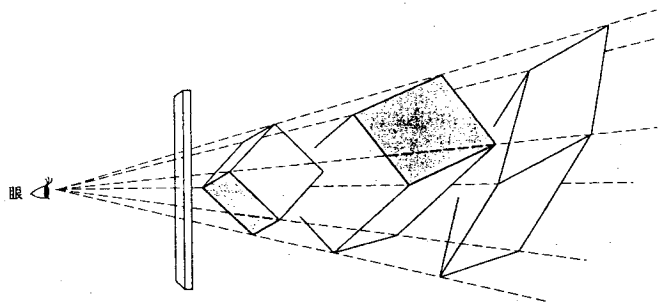


図9 同じ二次元網膜像を与える三次元構造は無数にある。一体、脳は、どうやって網膜像からもとの三次元構造を再構成するのだろうか(出典:椎名健「発達の心理学」講談社(1995)を一部改変)。

ん。そのような比喻は、外界世界が網膜に投影され、視細胞の活動を引き起こすまでのできごとにふさわしいのであって、「見る」ことの本質は、その網膜上の情報から、脳が世界の様子を再構築していく過程にあります。「脳が見る」というのは、気取った言葉遊びではなく、事実を言い表しているのです。

網膜を出発した視覚情報は、脳の中ほどにある視床(ししょう)という場所で中継された後、大脳皮質の中でも後頭部にある一次視覚野へ送られます。大脳皮質に含まれる視覚関連の仕事をしている場所(視覚領野といいます)は、30以上あり、一次視覚野からの情報は、次に、これらの領野に送られていきます(図10)。「見る」ということは一つの機能ではありません。物体の形、色、てざわり感、陰影、模様などからその物体が何であるかを知ったり、その物体の位置、大きさ、向き、動きなどを知って、その物体に対して行動をおこしたりします(例えば、手をのばしてつかむ)。網膜像が動いている時には、それは、見ている相手が動いたためなのか、それとも自分が動いたためなのかを区別しなくてははいけません。これらの様々な仕事に、図10に示した視覚領野の数々がどのように貢献しているのかが、徐々に、解明されつつあります。

さて、話を最初に戻して、脳は、不完全な網膜情報をもとにしながら、どうして物体像の再構成が可能なのでしょう。外界の情景が網膜に投影される時には、網膜画像は、物理世界の様々なルールに従って形成されます。「手前にある物体の輪郭は投影されるが、奥にあって遮蔽されたものの輪郭は投影されない」とか「視線を少し変えても物の見え方は大きく変わらない」などがそのルールの例です。当たり前聞こえると思いますが、だからこそ、ルールなのです。与えられた方程式(網膜情報)は不十分であっても、ルール(物理法則)を破らない構造は何かというヒント(これを拘束条件と呼びます)を用いることで、正しい答え(物体の3次元構造)を得ることができるのです。長い進化の産物である私たちの脳は、そのようなルールを、たくみに、視覚情報処理の中に組み込んでいます。私の講演では、いくつかの「不思議な」図形をお見せして、皆さんの脳がまさにそのようなルールを使っていることを体験していただき、上で述べた多数の視覚領野の中のどの細胞が、どのような拘束条件を利用した情報処理をしているのかを示す、最新の研究結果をご紹介します。

最後に、皆さんに私と一緒に悩んでいただきましょう。外界物理刺激(たとえば、光や音)が生体反応を引き起こす過程を、生物学は、説明しつつあります。同様に、脳科学が、このまま、脳にお

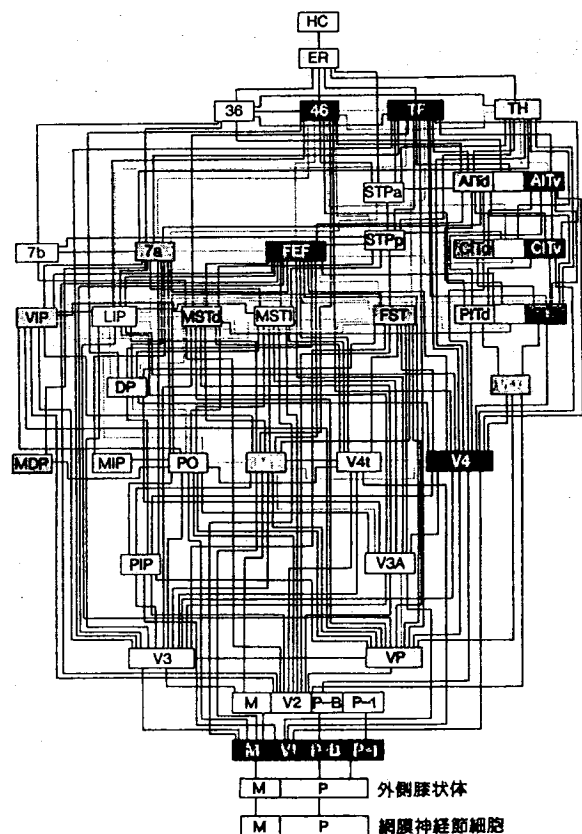


図10 マカカ属サルの大脳皮質視覚野の構成。30以上の視覚領野(それぞれ四角で囲ったある)とその間の連絡の様子が徐々に解明されつつある(Felleman and Van Essen, 1991, 1: 1-47より改変)。

ける様々な現象の解明を続けていけば、今度は、脳における生体现象が私たちの知覚や認識を生み出す過程を筋道立てて説明する(因果関係を与えると科学では言います)ことができるでしょうか。「しよせん、この世界には物質、エネルギー、情報しかないのだから、心といえども、これらのキーワードで説明できるはずだ。」というのが、多くの脳科学者の楽観的意見です。これは、本当でしょうか。脳は脳を理解できるのでしょうか。この問いに対する答えがYesであれ、Noであれ、人類にとっての大きな(おそらく最大の)チャレンジがそこにあることは間違いありません。このシンポジウム会場にいらしている高校生、大学生の皆さんのような野心と希望に満ちた若い方々が、脳科学の世界に飛び込んでくるのを期待しています。

用語の解説

イオンチャンネル

細胞膜にあるタンパク質の一種で、細胞膜を貫通する「孔」を形成する。この「孔」を通してイオンが細胞の内から外、あるいは外から内に移動することによって電気信号が発生する。

N-アセチルトランスフェラーゼ (NAT)

メラトニンはトリプトファンからいくつかのステップで生合成されるが、そのうちの1ステップを触媒する酵素の名前。セロトニンをN-アセチル化する。多くの動物の松果体では、この酵素の活性が概日時計に制御されて変動するため、メラトニンの合成量が24時間周期で変動する。

概日リズムと日周変動

概日リズムは、自律的に発振する概日時計に支配されている現象に対して用い、日周変動とは区別して使われる。概日時計に支配された現象は、たとえば、12時間ずつの明暗サイクルから恒常暗黒条件に移しても、およそ24時間周期で持続する。恒常暗黒に移すと周期性が見られなくなる現象は、概日時計に支配されているのではなく、明暗という光情報に従っている可能性が高い。

活動電位

神経や筋肉が活動するときに発生する膜電位の変化をいう。

ガラス微小電極

ガラスの細管を、熱をかけて引っ張って先端を $1\mu\text{m}$ 以下にして、中に3MのKClを詰めたもの。これを使うと、神経細胞や筋肉細胞に挿入して、静止電位や活動電位を測定することができる。

cGMP

視細胞における細胞内メッセンジャーで、cGMP依存性チャンネルに結合することによってチャンネルを開き、電気信号を発生する。

視細胞

視覚機能のために光を感じる細胞のことで、脊椎動物では網膜の桿体と錐体がこれにあたる。

Gタンパク質

細胞が、細胞間情報分子(ホルモンや神経伝達物質など)を受け取ったときに、その情報を細胞内へ伝える役割の仲立ちをする細胞膜に埋め込まれたタンパク質で、 α 、 β 、 γ の3つの部品

からできている。

静止電位

細胞が活動していないときの膜電位。膜の内側が負で、通常-60~-90mV。

脱分極

静止電位に対して電位が上昇（=負の分極が減少）すること。

百日咳毒素とトランスデューシン

トランスデューシンなど、ある種のGタンパク質 α サブユニット($G\alpha$)は、百日咳毒素によってADPリボシル化され、Gタンパク質としての機能を失う。これらの $G\alpha$ は、いずれもC末端から数えて4番目にCys残基をもち、百日咳毒素はこのCysの側鎖のSH基にNADを基質としてADPリボースを転移する。ニワトリ松果体細胞における概日時計の光位相シフト経路(光入力系)にトランスデューシンが関与していれば、松果体細胞を百日咳毒素で処理することによって、光位相シフトが見られなくなるはずである。しかし実際には、百日咳毒素を投与しても時計の光位相変化は影響をうけなかった。

膜電位

細胞膜をはさんで内と外の間で発生する電位差。

メラトニン

脊椎動物の松果体や網膜で夜間に合成・分泌されるホルモンの一種。両生類の黑色素胞を凝集させる作用をもつ物質として単離された。哺乳類においては、視交叉上核に存在する概日時計の位相調節を行う。睡眠を促進する効果は確認されているが、マスコミで注目されているような、免疫応答の強化、癌の予防、あるいは寿命を延ばす効果などには不明な点が多い。