

脳科学シリーズ

9. 錯視のメカニズム

—だまし絵が語る視覚認識の脳内機構—

大阪大学医学部認知脳科学講座 う か たか のり
宇賀貴紀

同上 教授 ふじ た いち ろう
藤田一郎

はじめに

空高く照る月は小さく、ビルのあいまから昇ろうとする月は大きく見えるなどの場合を除き、日常生活で錯視を経験することは数少ない。しかし、視覚認知心理学の教科書をひもとけば、同じ長さのものが違った長さに見えたり、直線が曲がって見えたり、静止した図形が動いて見えたり、といった様々な錯視図形(だまし絵)が並んでいる。これらの図形は、人間の脳における視覚認識機構を垣間見するための素晴らしい道具となっている。

本稿では、「私たちはなぜ錯視を見るのか」、「錯視を用いた研究は、視覚情報処理メカニズムについて私たちに何を語ってくれるのか」という問いに迫る。

I. 人間はなぜ錯視を見るのか

上記の問いに答えるためには、まず、視覚認識とはどのような脳内処理を必要としているのか、その枠組みを考える必要がある。現在、一番有力な考えは鋳型合わせ仮説(template matching hypothesis)で、「目から入力された画像情報をいろいろな方法で処理した結果が、脳内に記憶された物体像と合致することを認識とする」ものである。この仮説は、見たものがなぜ意識に上るのかは説明しないが、見た

ものを弁別し、正しく分類する能力について説明を与える。この仮説に沿って考えると、記憶された物体像は脳内のどこでどのように表現されているか、目から入った情報はどのように処理されて鋳型合わせに必要な十分な情報を持ち得るようになるのか、どのようにして合致が行われるのか、などの点が視覚認識を理解するのに重要であることになる。

私たちは物体を見るとき、網膜上に結像した画像を知覚しているのではない。網膜にある視細胞は、外界のある領域から反射される光の波長とその強度の時間的変化を教えてくれるにすぎない。しかも、視細胞の伝える画像情報は、多くの場合、物体像を復元するには本質的に情報を欠いている。というのは、同一の表面構造が照明条件、視線位置、遮蔽などにより、いかような網膜画像にもなり得るからである。また、同じ2次元網膜画像を与える3次元構造は無数に存在する。このような網膜画像情報から物体像を一意的に復元しなければならない。これは非常に難しいことで、人間のように物体を認識できるロボットやコンピュータはいまだ存在しない。にもかかわらず、私たちは、日常生活のほとんどの場合(すなわち、錯視の場合を除いて)、正しい物体像を一意的に認識できる。人間の脳内には、不十分な網膜画像情報を基に、正確

に物体像を復元する機構が存在するのである。

では、どのような機構が存在するのか？ 外界にある物体が網膜に投影されるとき、網膜画像は物理世界の様々なルールに従って形成される。例えば、「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」、「視線を少し変えても物体の見え方は大きく変わらない」などである。このようなルールを物理的制約条件 (physical constraint) という。物理的制約条件をヒントとして利用し、情報としては不十分な網膜画像から、その網膜画像を与える可能性の最も高い表面構造を「推論」する機構を、私たちの脳は長い進化の過程で獲得している^{1,2)}。これを端的に示しているのが図1である。白い部分が上にある円は出っ張って見え、黒い部分が上にあるものは凹んで見える。ところが、本を逆さにして同じ図を見ると、先ほどまで出っ張って見えた円は凹んで見え、凹んで見え

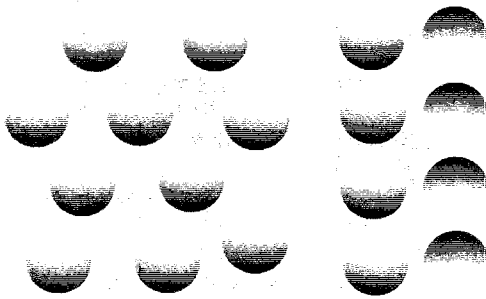


図1

陰影からの構造復元。白い部分が上にある円は出っ張って見え、黒い部分が上にあるものは凹んで見える。本を逆さにすると、出っ張って見えていたものは凹んで見え、凹んで見えていたものは出っ張って見える。「光は上から照る」という物理的制約条件が、脳による視覚情報処理機構の中に「知識」として組み込まれていることを示す。(Essentials of neural science and behavior, Appleton and Lange社より)

たものは出っ張って見える。「太陽は頭上で照り、光は下からこない」という物理的制約条件が、脳の視覚情報処理メカニズムの中に「知識」として組み込まれており、上半分が明るい表面は出っ張って見え、上半分が暗く見える表面は凹んで見えるという、物理的制約条件に沿った復元を、脳が行っていることをこの図は示している。

このように考えると、人間がなぜ錯視を見るか、錯視が視覚情報処理メカニズムについて何を教えてくれるかという問いへの答えが出てくる。網膜画像から出発した視覚情報を脳が処理するとき、画像に含まれる不適切な情報を削除し、欠けている情報を補間して、正しい物体像を復元しようと脳は「推論」を行う。しかし、正しくない復元が行われ、間違った物体像と鑄型合わせが生じてしまうと、物理的な外界の構造と認識との間に乖離が生じ、錯視の知覚が起こるのである。この間違った「推論」は、物体像の復元に脳がどのような手段を用いているのか、すなわち、脳がどのような物理的制約条件を画像情報の処理の中に「知識」として組み込んでいるのかを如実に示す。この意味において、錯視のメカニズムを調べることは、視覚系における情報処理のメカニズムを知るのに有効な手段となるのである。以下、その具体例を紹介する。

II. 充填：物体表面の滑らかさ

人間の目には盲点がある。網膜には視細胞が存在しない領域があり、そこに対応する視野部位からは光の情報が得られない。にもかかわらず、私たちは視野の中の一部だけ光が届いていないようには知覚しない。これはどうしてだろうか？

まず錯視を体験していただきたい(図2-1)。

図に示してあるのは黒い円盤である。しかし、黒い円盤がうまく盲点に一致すると、黒い円盤は消えて見えなくなってしまう。この現象は充填(filling-in)と呼ばれており、周辺の明さが内側に満ちていく現象である。

このような充填は盲点でのみ起きる現象で

はない。網膜に損傷をもつためにある領域から光の情報を得ることができない患者³⁾、人工的に網膜の一部を焼いたサルでも⁴⁾、その領域に充填が起きることが証明されている。更に、網膜に損傷がなくてもいい。穴のあいた織物模様を、視野の中心から離れた領域でじっと

1

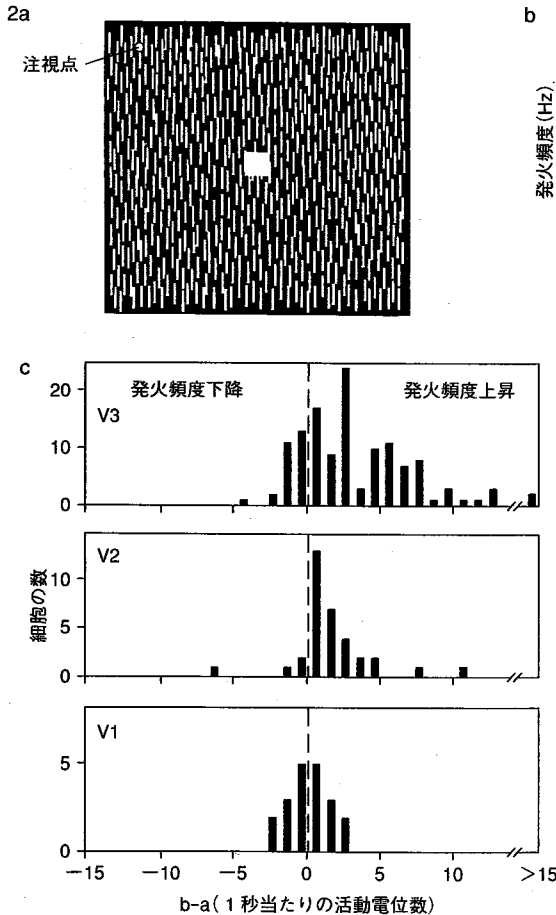
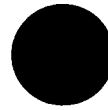


図2

1: 盲点の充填。左目を閉じ、右目だけで十字を注視する。本を近づけたり遠ざけたりして、十字と黒い円盤との相対距離を調節すると、ある瞬間に黒い円盤が消えて見えなくなってしまう。(Essentials of neural science and behavior, Appleton and Lange 社より)

2: 人工盲点充填を反映するニューロン活動。a; 実験に使われた穴の開いた織物模様の図。サルに注視点を注視させると、白く穴の開いた領域に周りの模様が充填する。b; 充填に反応したニューロンの例。模様穴がない場合(点線)には、刺激提示期間中ずっと反応が出る。穴が開いている場合(実線)には、充填の知覚と同じような時間関係で、6秒ほどしてからニューロンの発火頻度が上がってくる。c; 第2次視覚野(V2), 第3次視覚野(V3)にはbのように発火頻度が上昇するニューロンが多く見られるが、第1次視覚野(V1)ではあまり見られない。[文献6]より]

見続けると(いわゆる目のすみで見ると), 数秒のうちに周辺の模様が穴の中に充填してくる⁵⁾.

この充填という現象は, 「物体表面は滑らかである」という物理的制約条件に沿って, 脳が表面構造を復元した結果と考えられる. 物体の表面の色, 明るさ, 模様, 奥行きはいずれも多くの場合, 物体の端にくるまで連続的で滑らかである. しかし, 網膜に投影される画像は滑らかでない場合が多い. そこで, 物体表面の滑らかさを復元する機構が必要なのである. もし充填の機構がなかったら, もちろん盲点には光が達していないことがすぐに分かるし, デコボコした物体像が知覚されると思われる.

では, 充填が起きるときに脳内でどのようなことが起きているのだろうか? ここで, ニューロンの反応と充填の知覚の関係を調べた実験を紹介する. 視覚野のニューロンには, ある一定の領域からしか入力を受け付けられないという性質がある. その視野上の領域を受容野と呼ぶ. 受容野の外にある刺激に対してニューロンは反応を示さない. ここで先ほどの穴のあいた織物模様を使う(図 2-2a). 視野の中心から離れた領域で穴の開いた模様をじっと見つめていると, 数秒のうちに模様の充填が知覚される. では, 模様の穴の位置に受容野をもつニューロンは, 模様の充填が知覚されたときに反応を起こすのだろうか? もし反応を起こせば, このニューロンは充填の知覚を反映すると考えられるし, 反応を起こさなければ, 知覚を反映せず, 外からは何も入力されていないことを忠実に伝えていることになる. サルの第 1 次視覚野から第 3 次視覚野までのニューロンをこのように調べた結果, 第 2 次視覚野と第 3 次視覚野では大半の細胞

が, 物理的には存在しないが, 知覚的には存在する模様に対して反応を示すようになった. 一方, 第 1 次視覚野ではこのような反応はほとんどみられなかった⁶⁾(図 2-2b, c). つまり, 充填を反映するニューロン活動は, 第 1 次視覚野から第 2 次視覚野への情報の変換の結果, 生まれることが示唆されたのである. 更に, この結果は第 1 次視覚野のニューロン活動だけでは私たちの知覚は説明できないことを端的に示している. どのような情報処理の結果, このようなニューロン活動を作り上げることができるのか, 現在盛んに研究されている.

Ⅲ. 主観的輪郭: 図地の分化と奥行きへの制約

物体表面の滑らかさを復元する機構が, 視覚情報処理の比較的初期の段階で出来上がってしまうことは分かった. しかし, 初期の段階ですべての画像が充填されると, 視野は一律な明るさの滑らかな表面になってしまうだろう. それを防ぐ秘密も視覚情報処理の初期に存在するはずである.

次の錯視(図 3-1)を見てみよう. これはカニツァの三角形と呼ばれる有名な錯視である. 白い背景の上に, 白い楔を打ち込んだ 3 つの黒い円を三角形の頂点に配置すると, 楔の辺がお互いに輪郭でつながり, 白い三角形が 3 つの黒い円盤を遮蔽しているように見える. 明るさや色の違いなど, 物理的には輪郭を見る手がかりがないにもかかわらず, 三角形の辺の輪郭が知覚され, 三角形の内側は外側より明るく見える. このように, 欠けている情報を補うように知覚される輪郭を主観的輪郭(subjective contour あるいは illusory contour)と呼ぶ. なぜ物理的に輪郭のないところに輪郭が見えてしまうのだろうか?

私たちは物体を認識するとき, 必ず物体に

属する領域と背景に属する領域とを区別している。このことを図地の分化 (figure-ground segregation) と呼ぶ。もし、物体が2つある場合には、画像のどの領域がどちらの物体に属するのかも区別できる。そして、1つの物体と判断された領域は、情報が欠けている場合、その情報を補間することができる。このとき、「手前にある物体には輪郭が存在し、逆に奥で遮蔽されている物体の輪郭は見えない」という奥行き関係の物理的制約条件に沿って、脳は輪郭を補間する。つまり、主観的輪郭は脳が物体と背景とを分離する過程に起因する錯視なのである。

では、どのようにして輪郭のないところに主観的な輪郭を描くのだろうか？ 同様に主観的輪郭に反応するニューロンを紹介する。先ほどの話のように、ニューロンは受容野の外にある刺激に対して反応しない。ここで図3-2bのように2本の棒を配置すると、その間に主観的輪郭が知覚される。では、2本の棒の間に受容野をもつニューロンは、主観的輪郭が知覚されるときに、反応を起こすのだろうか？ もし反応を起こせば、主観的輪郭の知覚を反映すると考えられるし、反応を起こさなければ、知覚を反映せず、そこには棒が存在しないことを忠実に伝えていることになる。サル第1次視覚野と第2次視覚野をこのように調べた結果、主観的輪郭に反応する細胞は第2次視覚野には見られたが、第1次視覚野には見られなかった⁷⁾。輪郭の補間も第1次視覚野から第2次視覚野への情報の変換の結果、生まれることが示唆されたのである。現在、第1次視覚野にも主観的輪郭に反応するニューロンが存在するという報告があるが、その内容については異論もある⁸⁾。いずれにしろ、視覚情報処理の比較的初期の段階で、既

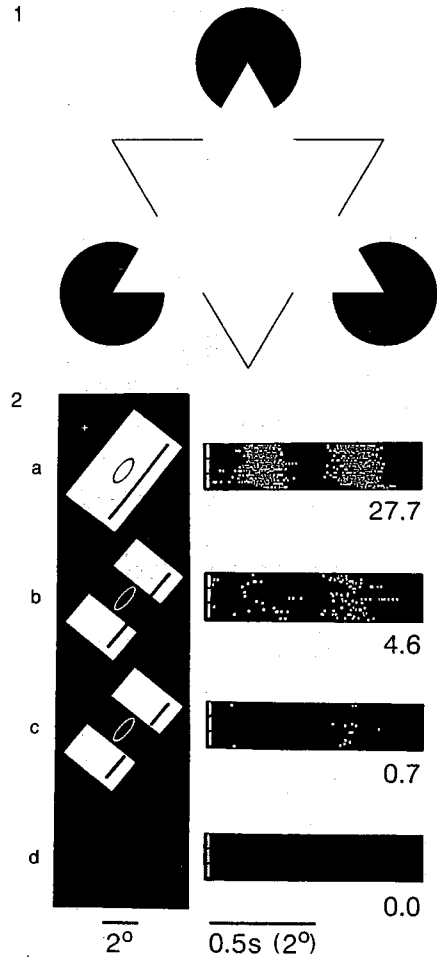
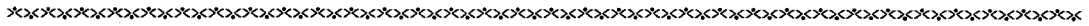


図3

1: カニッツアの三角形。輪郭を知覚する物理的な手がかりがないにもかかわらず、三角形の輪郭が知覚される。(Essentials of neural science and behavior, Appleton and Lange 社より)

2: 第2次視覚野(V2)にある主観的輪郭を反映するニューロン活動。楕円はニューロンの受容野。白い点がニューロンの発火を表し、右下の数字はニューロンの発火頻度を表す。a; ニューロンが棒(実輪郭)に反応することが確かめられている。b; 主観的輪郭にニューロンが反応している。c; 主観的輪郭が形成されないように小さな変化が与えられているが、この時ニューロンも反応しなくなる。d; 自発発火。[文献7)より]



に主観的輪郭の脳内表現が出来上がっていることに変わりはない。物体と背景との分離が、視覚情報処理の初期の段階で始まっている証拠である。

IV. ネオン色拡散：一般像抽出原則

次の錯視はネオン色拡散 (neon-color spread-

ing) と呼ばれているものである (図 4-1)。赤い十字 (図中の斜線部) の 4 本の腕から白い腕が更に伸びている。すると、赤い十字から赤色が黒背景ににじみ出し、赤い半透明な円盤が白い十字を遮蔽しているように見える。両眼視差をつけることにより、赤い十字が手前にくるようにすると、ネオン色拡散効果は更に

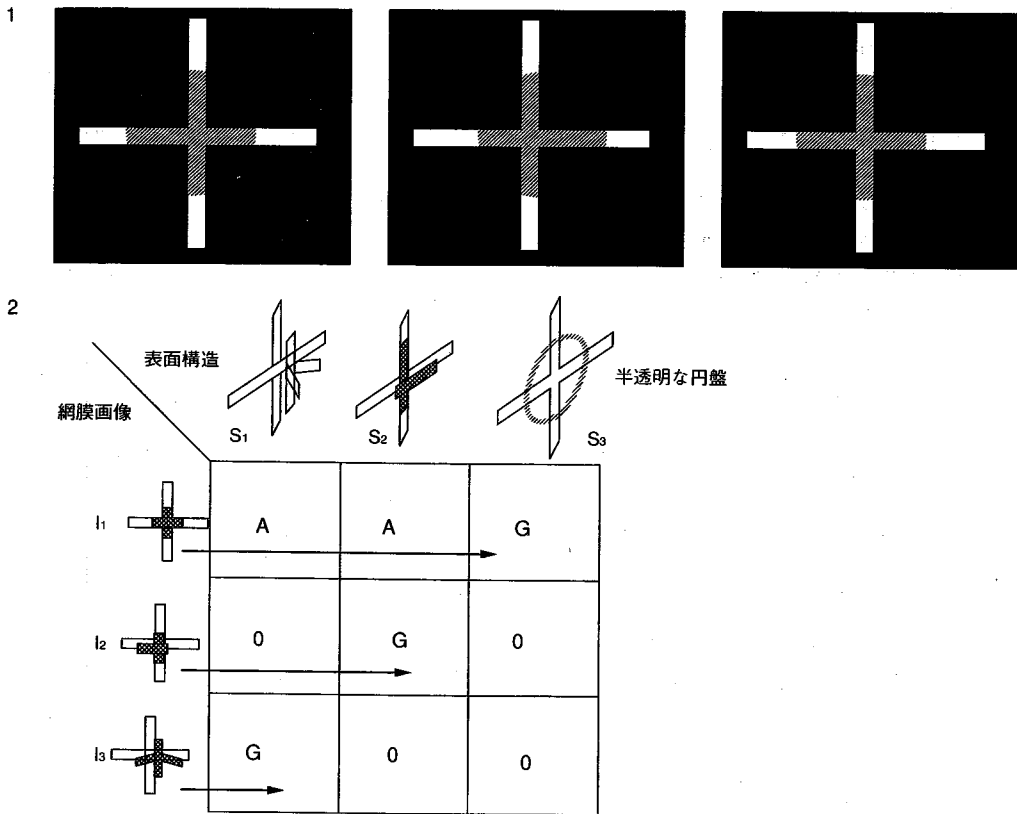
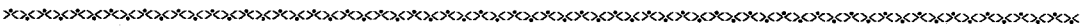


図 4

1: ネオン色拡散。斜線部は赤。赤い十字の 4 本の腕から白い腕が伸びているだけなのに、赤い半透明な円盤が白い十字を遮蔽しているように見える。右目で右の図を、左目で中央の図を見るか (並行法)、右目で左の図、左目で中央の図を見る (交差法) ことにより両眼立体視し、赤い十字が手前にくるようにすると、ネオン色拡散がより鮮明になる。

2: 一般像抽出原則。A は偶発的に起こる確率、G は高確率で起こる確率、0 は可能性がないことを表す。3次元表面構造 S_1, S_2, S_3 を網膜に投影すると、網膜画像は、それぞれ一般的に I_3, I_2, I_1 になる。 I_1 を与えられた脳はそこから S_1, S_2 と推論することもできるが、一般的にその画像をもたらず S_3 を推論する。 [文献 2) より]



上がる。この錯視は、赤い十字の端を主観的輪郭でつなぎ、その中を色の充填ならぬ拡散で満たせばだいたい説明できそうである。でも、この図はなぜ白い十字の真上に赤い十字が浮かんでいるように見えないのだろうか？

Nakayama と Shimojo はこの錯視を以下のように説明している²⁾(図4-2)。この図は白い十字の上に赤い十字が浮かんでいるように解釈してもおかしくはない。しかし、十字の上に十字がピッタリと重なる状況は滅多になく、偶発的である。というのは、少しでも視線を動かしたら、上の赤い十字は白い十字からずれてしまうからである。それよりも、赤い半透明な円盤が白い十字の上ののっていると解釈した方が、視線位置により違った画像を得ない点で、より一般的な解釈だと考えられる。私たちはある網膜画像を与えられたときに、その像を最も高い確率でもたす表面構造を、「視線を少し変えても物体の見え方は大きく変わらない」という物理的制約条件に沿って「推論」しているのである。これを Nakayama と Shimojo は一般像抽出原則(principle of generic image sampling)と呼んでいる。「推論」による解釈の方が物理的な画像にも勝ってしまうというのである。

実際に脳内でどのようにこの「推論」が行われているのか、現在では全く分からない。充填と主観的輪郭の形成が視覚情報処理の初期段階で出来上がることを考えると、その組み合わせでネオン色拡散も視覚情報処理の初期段階でできると考えてもおかしくない。しかし、「視線を少し変えても物体の見え方は大きく変わらない」という物理的制約条件に沿った計算までもが、視覚情報処理の初期段階で解かれてしまうのだろうか？ 今後の研究が必要な分野である。

V. 表面構造の知覚から認識へ

このように脳は与えられた網膜画像から、その2次元画像を生み出す可能性が最も高いと考えられる物体像を復元する。しかし、このような情報処理を経て物体像の復元が行われてもそれで視覚認識が終わるわけではない。最後の段階で記憶された鋳型との照合が待ち受けている。そこで図5を見ていただきたい。上段ではA, B, Cと認識され、下段では12, 13, 14と認識されるが、上段、下段の真ん中の図は同じものである。これは、物理的には同じものを見ているにもかかわらず、周りの状況(文脈)から認識が変わってくる多義図形である。

このことからどのようなことが分かるだろうか？ それは、認識には文脈による分類が必要だということである。おそらく脳のどこかに数字や文字を表現するニューロンあるいはそれらが集まった機能単位構造(モジュール構造)がそれぞれ存在し、それが認識過程にバイアスをかけているだろうと考えることができる。実は、これは脳内に記憶された物体像がどのように格納されているかという問題にかかわってくる。もし、記憶された物体像の中に、数字や文字を表現するモジュール構造が

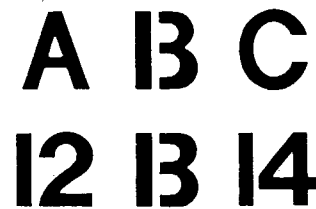


図5

文脈で認識が変わる多義図形。中央の図は上下段とも同じであるが、上段はA, B, Cと認識され、下段は12, 13, 14と認識される。(最新認知心理学への招待, サイエンス社より)

あるとしたら、それは数字や文字の図形特徴のみに規定されず、その内容を表現するモジュール構造でなければならない。また、記憶された物体像の中に、数字や文字を表現するモジュール構造がないとしたら、鋳型合わせが終わった後に、脳の別のところにある数字や文字を表現するモジュール構造から、数字や文字に関する情報を認識過程の一部として引き出さなければならない。現在、物体像が脳内のどこにどのようにして格納されているのか、いまだ決着をみていない。サルの脳局所破壊実験などより、側頭葉のどこかにあることは示唆されている。実際、部分的な図形特徴に規定されず、特定の物体そのものに反応する側頭葉のニューロンとして、顔に应答するニューロン、手に应答するニューロン⁹⁾や、弁別課題の訓練に使用された物体に特異的に应答するニューロン¹⁰⁾が報告されている。しかし、これらのニューロンが本当に顔、手、弁別課題の訓練に使用された物体にしか反応しないのかの検証はいまだ十分でない。まして、対象の内容を表現するニューロンやモジュール構造は知られていない。側頭葉のモジュール構造としては、サルの側頭葉 TE 野のコラム構造が知られている¹¹⁾が、これは物体の部分的な図形特徴が表現されているコラムであり、表面構造復元の最終段階をつかさどるモジュール構造とは考えられるが、文脈による分類を実現しているとは考えにくい。

VI. サギの錯視、脳科学者の夢

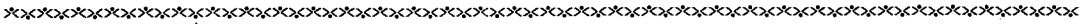
ここまで、錯視は物体像の復元に脳がどのような手段を用いているのかを教えてくださいと書いてきた。しかし、すべての錯視がそうとは限らない。例えば、コップに水を入れてその中に棒を入れると、私たちには棒が曲が

って見えてしまう。光が空気以外の媒体を通ってきたとき、その屈折を補正する機構が私たちの脳にはないことを物語っている。一方、水上から水中の餌を正確にとることができる水鳥(例えばサギの仲間)には光の屈折を補正する機構があり¹²⁾、また、水中から水上の獲物を口からの水鉄砲でとらえるテッポウオには逆のメカニズムがある¹³⁾。異なった淘汰圧にさらされて進化してきた動物は、同じ物理的制約条件を違った形で脳の中に「知識」として組み込んでいるのである。

最後に指摘しておきたいのは、本稿で紹介した、錯視を反映するニューロン活動が、錯視と因果関係があるかどうかは現段階では不明だということである。つまり、錯視を反映するニューロン活動が、錯視の原因であるとは限らない。あくまでも、錯視を見たという知覚とニューロンが発火したという現象が相関することが示されただけである。両者の間の因果関係を確立するということは、ニューロンの活動と我々の知覚意識との間の因果関係を示す、すなわち、心が脳から生まれるということを示すことにほかならない。脳科学者の遠い夢である。

文 献

- 1) Poggio T et al : Computational vision and regularization theory. *Nature* **317** : 314-319, 1985.
- 2) Nakayama K, Shimojo S : Experiencing and perceiving visual surfaces. *Science* **257** : 1357-1363, 1992.
- 3) Sergent J : An investigation into perceptual completion in blind areas of the visual field. *Brain* **111** : 347-373, 1988.
- 4) Komatsu H, Murakami I : Behavioral evidence of filling-in at the blind spot of the monkey. *Vis Neurosci* **11** : 1103-1113, 1994.
- 5) Ramachandran VS, Gregory RL : Perceptual filling-in of artificially induced scotomas in human vision.



- Nature **350** : 699-702, 1991.
- 6) De Weerd P et al : Responses of cells in monkey visual cortex during perceptual filling-in of an artificial scotoma. Nature **377** : 731-734, 1995.
 - 7) Peterhans E, von der Heydt R : Mechanisms of contour perception in monkey visual cortex. 2. Contours bridging gaps. J Neurosci **9** : 1749-1763, 1989.
 - 8) Grosf DH et al : Macaque V1 neurons can signal 'illusory' contours. Nature **365** : 550-552, 1993.
 - 9) Gross CG et al : Visual properties of neurons in inferotemporal cortex of the macaque. J Neurophysiol **35** : 96-111, 1972.
 - 10) Logothetis NK, Pauls J : Psychophysical and physiological evidence for viewer-centered object representation in the primate. Cereb Cortex **5** : 270-288, 1995.
 - 11) Fujita I et al : Columns for visual features of objects in monkey inferotemporal cortex. Nature **360** : 343-346, 1992.
 - 12) Katzir G, Intrator N : Striking of underwater prey by reef heron, *Egretta gularis schistacea*. J Comp Physiol A **160** : 517-523, 1987.
 - 13) Dill LM : Refraction and the spitting behavior of the archerfish, *Toxotes chatareus*. Behav Ecol Sociobiol **2** : 169-184, 1977.

