

# 視覚研究ツールとしての錯視

村上 郁也

## Visual Illusions as Tools for Vision Research

Ikuya MURAKAMI

This article aims to take an overview on the scientific importance of visual illusions in basic vision research. First, I try to re-define visual illusions from the viewpoint of vision scientists: visual illusions are the phenomena that cannot be accounted for by a currently assumed visual processing system. Second, I explain how to utilize visual illusions in psychophysical investigations. Illusions are edge cases in which particular inputs yield nonidentical outputs, unlike our visual experiences in daily life, and from which we can estimate internal functions and mechanisms in the visual system. Third, I introduce several examples of illusions as tools for vision research. Finally, I mention the usability of illusions in neurophysiology and functional brain imaging, especially for researchers studying neural correlates of consciousness.

**Key words:** human vision, illusion, visual system, psychophysics, consciousness

錯視図形は、変なふうに見える<sup>1)</sup>。面白い。この面白い見えは非専門家の興味をひくに十分な単純明解さで万人の視覚世界に立ち現れ、生体情報処理の不思議さに気づかせてくれる格好の具材だし、何しろただで使えるので、近年はマスメディアにおいても盛んに取り扱われている。非専門家の錯視に対する興味をこのようにかきたててもらっている今、視覚研究の現場で錯視現象が何のためにどのように用いられているかを情報発信するのは研究者の喫緊の課題である<sup>2)</sup>。

### 1. 錯視の定義

錯視について解説するために、まず錯視とは何かを定義することが自然な流れかもしれない。いくつかの方向から錯視の定義を試してみよう。

例えばミュラー-リヤー錯視 (Müller-Lyer illusion) の図形を観察すると、2本の線分が同じ長さであるにもかかわらず、一方の線分が他方より長く見える (図1(A))。ならば錯視とは、入力画像の物理的な特性と対応しない何かを知覚することと定義されようか。では、今度は立方体の投影を紙に印刷したものを眺めてみよう (図1(B))。間違い

なくボリューム感をもった立方体に見える。しかし物理的には、紙に印刷された線分からなる閉図形の集まりにすぎない。立方体の投影から立方体を知覚することは錯視だろうか？ また、TV映像を観察してみよう。ディスプレイ平面上に流れるさまざまな輝度の二次元の光パターンでなく、広大に広がる風景や人物の顔かたちのふくらみがありありと感じられる。これは錯視だろうか？ もっと極端な議論をすれば、あらゆる視覚入力は網膜像であって二次元である。その物理的な特性と対応しない立体的な視覚世界を認知することは錯視だろうか？

眼前の世界に奥行き感が見えたり、外界の事物を大きさ・形の恒常性を保って認知したりすることを錯視と呼ぶないために、では立場を変えて、錯視とは、ある物理的な三次元外界構造の投影像が入力されたとき、その物理的な三次元外界構造から逸脱した何かを知覚することと定義しようか。しかしこれでは、われわれが錯視と呼んで慣れ親しんでいる多くが定義から外れることになる。例えばこういう主張がある。先ほどのミュラー-リヤー錯視図形は実際には建物のかどを投影したもののなのだ。凸の部分と凹の部分と同時に観察しているとすれば、観察距離が近い・遠

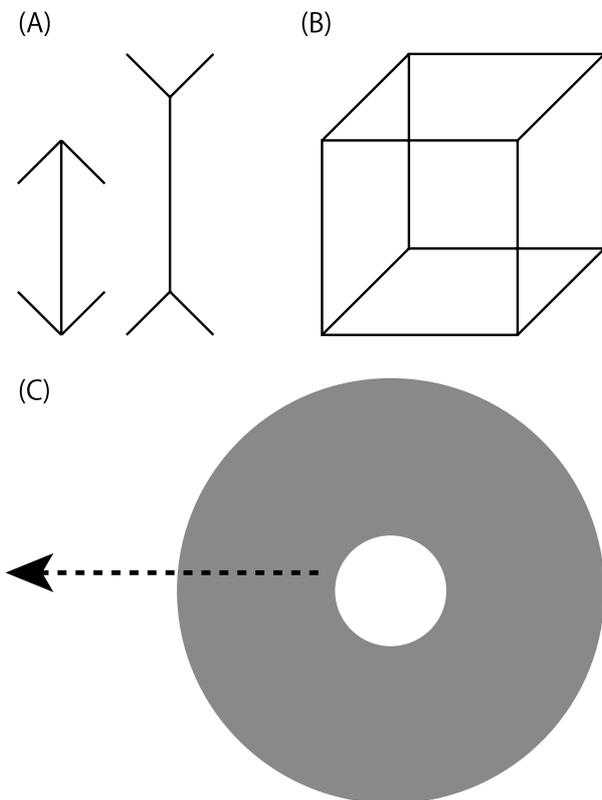


図1 錯視の例。(A)ミュラーリヤー錯視。垂直線分は右のものが左のものより長く見えるが、誌面上では同じ長さである。(B)ネッカーの立方体 (Necker cube)。立方体を平行投影した二次元図形を見ると、ありありと立体感が感じられるが、誌面上では単に線分が集まってできた形に過ぎない。ちなみに、左下と右上の正方形面のいずれが手前に見えるかが曖昧であるので、ネッカーの立方体は多義図形の一例である。人間がこれを観察すると、2つの解釈のいずれかがとられ、両眼視野闘争の場合と同じく、それらが数秒間隔で交替して知覚される。(C)盲点における知覚的充填。右眼だけ開き、破線矢印の向きに徐々に視線を移動していくと、ある場所で右側の黒い中抜き円が充実円のように見える。このとき、中抜き円の内円は右眼盲点内部に入っており、黒い色が盲点内部まで充填して見える。

いの違いをもって観察していることになる<sup>3)</sup>。それらの投影像が同じ長さなら、エンメルトの法則 (Emmert's law) に従い、その原因となる外界構造においては前者が短く後者が長くなくてはおかしい。ミュラーリヤー図形に見える線分の長さの違いは、物理的な三次元外界構造を正しく認識した結果なのである。よって錯視ではない。また、盲点における充填を考えてみよう (図1(C))。盲点に相当する網膜上では光受容器が存在しない。視覚入力がない場合にデフォルト値として例えば灰色とみなすようなシステムならば、盲点には常に灰色の孔が空いているように見えるはずである。ところがそうは見えず、周囲の色などの属性が盲点内部に充填する。盲点境界を覆うような青色のドーナツ型の図形を呈示すると、盲点内部が青色一色で埋め尽くされる<sup>4)</sup>。外界の認知という視覚系の目的から照ら

して、盲点は生体側の受像機の単なる不具合に過ぎず、それを克服して物理的な三次元外界構造を復元しようとした結果が充填知覚なのである。よって錯視ではない。それでいいのだろうか？

## 2. 視覚研究ツールとしての錯視

上述の議論が正しいか間違いか以前に何となく不毛なように思われるのは、おそらく考え方の方向性を誤っているからだ。錯視とは、入力された二次元画像から逸脱した知覚が生じることでなく、外界の三次元世界から逸脱した知覚が生じることでない。こうしてみたらどうか。ある視覚情報処理システムを仮定して、何らかの図形を入力したとき、そのシステムからの予測と逸脱した知覚が生じるとする。これを錯視と呼び、これをもたらし図形を錯視図形と呼ぼう。この定義であれば、二次元画像をそのまま写しとって撮影するだけのシステムにとってはミュラーリヤー錯視は錯視だし、感光素子が一部分欠けたカメラとして盲点つきの眼がモデル化された情報処理システムにとっては知覚的充填は錯視である。その仮定されたシステムからは絶対に予測しえないような出力が現に生じているのであって、したがって仮定されたシステムに何らかの改訂を迫る強制力をもっている、動かぬ証拠である。筆者の思うに、これが錯視の本質である。

この主張が認められるならば、従来の知識では説明できない知覚現象が生じることをもって、錯視と定義されることになる。新たな問題提起をする現象こそが錯視なのである。つまり、錯視は見た感じが面白い現象であるだけでなく視覚研究ツールとしての有用性もある、というのは話が逆であって、視覚研究ツールとしての有用性がある現象を錯視と呼び、それはたまたま、見た感じが面白いのである。なぜ面白いかという、専門家か否かによって知識に差はあれど、人はみな視覚に関する知識なり信念なりをもち、それと異なる動かぬ証拠を自分の視覚系で体験するから面白いのである。

では、見た目面白いし今まで見たことはないけれどわれわれの理解する情報処理システムに関して新たな問題提起をするわけではない現象は、錯視ではないのだろうか。そう思う人にとってはそれは錯視ではないのだろう。アーチファクトという表現を保守的に使えばよい。このように、ある現象が錯視なのか否かを決めるのはそれを評価する人の判断基準と、その現象が新たな問題提起をしていることにどれだけ敏感に気づけるかというその人の感度に依存するのだろう。また、世の中には錯視図形という決まった特別な図形があるわけでもない。上に定義されたところの錯

視は種々様々であり、日々生まれ、進化してゆく。それらの錯視をもたらす図形を錯視図形と呼びならわすだけのことである。極端な事例でいえば、正弦波の輝度グレーティングがある。これを一定速度で運動させると、明るさの空間変調が正弦波でなく矩形波に近いように見える<sup>5)</sup>。これは運動方向と無関係に明るさを認識する単純なシステムを仮定しては絶対説明できない現象であり、運動による鮮明化 (motion sharpening) と呼ばれるれっきとした錯視だ。したがって、正弦波はれっきとした錯視図形なのである。おそらくそういう言葉遣いをして現場ではさほど違和感はないだろう。

### 3. 錯視の分類

研究対象をいくつかの下位概念に分類することは重要な作業である。例えば、Gregory によって錯視の大まかな分類が提出されている<sup>6)</sup>。ただ、錯視は多段階の情報処理を経た最終出力であるため、動物分類学のように明確に区分けできるわけではない。ひとつの錯視名で呼ばれる現象をもたらすメカニズムが複数の情報処理段階にわたって散在するのに対応して、分類の仕方によってはひとつの現象が複数の範疇にわたって散在するかもしれない。例えば、同じ灰色領域でも周囲が暗いときには明るく見え周囲が明るいときには暗く見える、同時明るさ対比 (simultaneous brightness contrast) という錯視現象ひとつとっても (図 2 (A))、同心円受容野による側抑制メカニズム、多重空間スケールの明るさ統合、領域内の明るさ充填、照明強度を差し引いた表面反射率の計算、などさまざまな切り口があり<sup>7-12)</sup>、現象で分類してもメカニズムで分類しても完全に背反な分類をすることは容易ではない。錯視研究者に大いに参考となる近著『錯視の科学ハンドブック』においても、多数の錯視現象が網羅的に取り上げられながら錯視を分類する試みは巧妙に避けられている<sup>13)</sup>。本稿では節立ての都合上、錯視を分類しているかのように記述する箇所もあるが、それらは便宜的なものに過ぎない。

### 4. 知覚心理学研究と錯視

視知覚の実験心理学的研究でできることは非常に限られている。稼働している視覚系の実体の内部をじかに測定・操作できない以上、適刺激である何らかの網膜像を眼に入力して何らかの視覚体験を被験者の心に出力させて、入力と出力との間の関数関係を記述することしかできない。その入力-出力関係から内部の挙動を推定することが、心理物理学が視覚系の解明に寄与できる唯一の手段である。

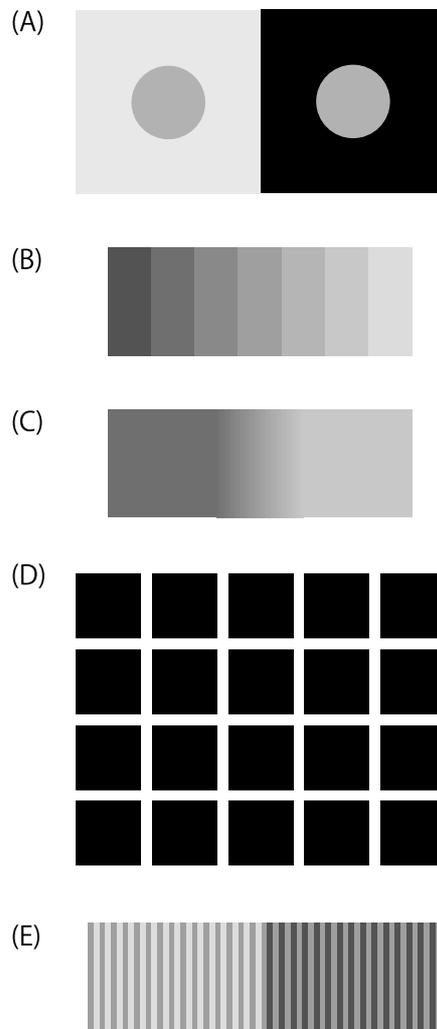


図 2 明るさの錯視。(A)同時明るさ対比。誌面上では左の丸と右の丸は同じ灰色で塗られているが、左は暗く右は明るく見える。(B)シェヴルール錯視。誌面上では単に光強度が階段状をなしている。しかし知覚的には、光強度の変化する場所では暗い側がより暗く、明るい側がより明るく見える。いうなれば、明るさの空間微分信号で画像が強調されたように見える。(C)マッハの帯。左から右へ行くにつれて、紙面上の光強度は最初はフラットな濃灰色で、あるところから右上がりの直線的増加をなし、それが終わりフラットな淡灰色になる。しかし知覚的には、左から右へ、明るくなり始める場所は他の場所より暗く見え、明るくなる増加が終わってまたフラットになる場所は他の場所より明るく見える。これも、差が強調されて見える錯視といえる。(D)ヘルマンの格子。白い部分を道路に見立てたとして、交差点部分がぼんやりと暗く見える。しかし視野中心で観察するとあまり目立たない。(E)明るさの同化。誌面上では左と右とで灰色領域は同じ灰色だが、明るい縞に重なったほうは明るく、暗い縞に重なったほうは暗く見える。

#### 4.1 心理物理学の手段としての錯視

生体にとっては望ましいことに、しかしわれわれ研究者にとっては困ったことに、視覚健常者においてはほとんどあらゆる場面において入力と出力との関係があたかも恒等写像であるかのような、つまり常に外界適合的な正しい認

知をするかのような、そんな知覚体験を日常的にしている。調べてみると実際は恒等写像からは程遠いのだが、そうだとすると、経験的には疑いなかろう。ひまわりを見てひまわりが見える、鉛筆を見て鉛筆が見える、云々。しかしこれではわれわれの視覚系特有の入力-出力をとりもつ関数関係を説明することができない。心理物理学者がこの目的のためにとりうる手段は—あえて乱暴に述べれば—大別して3つしかない。第1に、何らかの検出閾を測定してシステムの感度を何らかの横軸上に描き、光学でいう変調伝達関数 (modulation transfer function; MTF) と類似の関数関係を見出すこと。例としては、空間周波数ごとに輝度コントラスト閾を測定して得られる空間的コントラスト感度関数 (contrast sensitivity function; CSF) が挙げられる<sup>14)</sup>。第2に、知覚課題遂行時に課題無関連刺激を与えてノイズ耐性やマスキング効果をみること。外からノイズを入れて、視覚系内部にもともと存在するノイズと等しい感度低下効果をもたらすようなノイズ量を定める、等価雑音解析 (equivalent noise analysis) はその一例だろう<sup>15)</sup>。第3に、特殊な視覚入力信号を与えてシステムに奇妙な反応が生じるのを見ること、すなわち錯視を発見して利用することである。いわば「境界事例」での挙動がどのようであるかによって、視覚系特有のメカニズムのあり方に拘束が与えられ、通常の知覚体験だけでは明らかにできない視覚系の関数関係を説明できたり、その関係を実現するシステム内部のメカニズムを推定できたりする。その意味で、しばしば錯視は「心理学者の微小電極」と称される<sup>16)</sup>。

錯視量は、仮定されたシステム (典型的には、画面上の光の物理的配置そのままが知覚に至るはずだという帰無仮説) からの逸脱として、恒常誤差 (constant error), 知覚的バイアス (perceptual bias), 主観的等価点 (point of subjective equality; PSE) などと呼ばれる実測値として厳密に定量化することができる<sup>17)</sup>。ゆえに、実験室的な閾付近の領域だけでなく、われわれの日常生活で用いるところの閾上領域での挙動をデータ化することのできる貴重な機会のひとつである。錯視の定量化には、どのくらい強烈に見えるかを限られた整数から選ばせる評定法、限られた範囲の数値で答えさせるマグニチュード推定法、見えの様子を参照刺激の物理量で合わせる (例えば傾きの錯視と同じ向きになるように別の刺激の方位を合わせるなど) マッチング法、錯視量を相殺して見かけ上錯視がなくなるために必要な物理量すなわちPSEを測定する (例えば、左向きに動いて見える錯視を相殺するために、錯視が生じている刺激そのものを物理的に右向きに動かすなど) キャンセレーション法などがある<sup>18)</sup>。錯視の成立を証拠づけるには、そ

の錯視量が上記の帰無仮説では説明できない統計的有意性をもつかを仮説検定すればよく、自然科学の約束事と同じである。

錯視の知覚心理学研究に以上のような客観的手法を導入するのは、意味のない形式主義といわれる場合もあろう。万人に明らかに見えるロバストな錯視が一個あれば、百の数値グラフよりはるかに訴える力があることも多い。ある有名な論文では、陰影からの立体形状知覚は単一光源の仮定のもとでなされ、遮蔽の手がかりとの整合性が制約として置かれる、などの主張が、多数の錯視図形の図示と純粋な現象記述のみで示された<sup>19)</sup>。定量化は難しいが、あえてするまでもない。見ればわかるからだというわけだ。しかし、特に症例研究や動物研究など、他者にとってそれがどう見えているかが自明でない場合には、この論法は通じない。それに、何らかの変数に従って錯視が定量的に変遷するふるまいこそに意味がある場合も多い。

#### 4.2 心理学者の微小電極

生理学者が錯視の神経対応に興味をもってニューロン活動を記録するように、心理学者は錯視の責任中枢を同定する研究目的でさまざまなテクニックを駆使する。視覚系のどこで錯視が起こるかなど、すべての計算の最終結果である知覚印象などから本来判断できるはずがない。しかし、視覚神経系については解剖学・生理学からの先行知見が得られているので、それらとの対応で場所性を論じることができる。最も典型的なのは単眼性段階と両眼性段階であり、眼からの情報は最初は単眼性に処理され、皮質に入ってから両眼性神経応答が出現する。よって、ある錯視にとって必須の二者—例えば、順応刺激とテスト刺激—を両眼分離呈示したときに錯視がなくなれば、その錯視の責任中枢は単眼性だと考えられる<sup>20)</sup>。それに対し、両眼融合して初めて定義される図形で錯視が生じれば、責任中枢は両眼性ということになる<sup>21)</sup>。また、最近数十年の神経生理学の営みにより、視覚神経系の初期処理ではある程度の並列性があつて、高時間分解能の大細胞系、高空間分解能の小細胞系、三色型色覚の信号を運ぶ顆粒細胞系の3種の経路で機能分化していることが知られるようになった<sup>22, 23)</sup>。これらの特性から、例えば輝度変化がなく色の違いだけで定義された図形にして、「色盲」の大細胞系にとっては不可視な図形にしたとすると、このような等輝度図形で錯視がなくなれば、大細胞系が本来その錯視にとって必須であつたということになる<sup>24)</sup>。さらに、ある錯視が生じたことによつて出現する見かけ上の知覚像が、別の錯視を生じさせる誘導図形になつたとすれば、2つの錯視の責任中枢の間の階層構造を論じられるかもしれない。後述する運動錯視

では、誘導運動での見かけの動きに順応した後で運動残効が起きたり、周りの運動残効によって誘導運動が生じたり、といった奇妙な関係が報告されていて興味深い<sup>25)</sup>。

とはいえ、心理学研究で心理現象の脳内責任中枢を真に同定できるものではない。上記のテクニックで得られるであろう責任中枢云々は、結局のところ、われわれの力の及ぶ限りを尽くしてたどり着くべき視覚系の機能的ブロック図に過ぎない。それら作業仮説によって、実際の脳でどの視覚領域に生理学者が実際の電極を刺入すべきか、ヒト脳機能計測でどのような刺激呈示のデザインにすべきか、神経系モデルの計算アルゴリズムをどのように組むべきかなどにヒントが与えられれば、研究ディシプリン間にまたがってサイエンスの積み上げに貢献したことになるだろう。

### 4.3 対比と同化

ここからは、錯視が知覚心理学に貢献してきた実績を何件か紹介するが、決して網羅的ではなく、むしろ膨大な知見群からわずかに数例を紹介するに過ぎない。まず空間的な対比と同化の錯視をとりあげてみよう。古典的なもののひとつとしてシェヴルール錯視 (Chevreul illusion) を見てみると、物理的には階段状の輝度パターンであるにもかかわらず、われわれがこれを見ると境界部分の明るさの差が強調されて見える (図2(B))。物理的な輝度がそのまま意識にのぼるといふ単純なシステムを仮定しては、この現象は説明できない。マッハの帯 (Mach band) やヘルマンの格子 (Hermann grid) といった他の錯視群と同様に (図2(C), (D))、この錯視は境界の明るさの違いを強調する分節化メカニズムの存在を示唆し、明るさに関する同心円状の拮抗受容野や帯域フィルターのようなものを導入して説明される。これに対し明るさの同化 (brightness assimilation) では、逆に、白い縞に挟まれた灰色は明るく、黒い縞に挟まれた灰色は暗く見え、周囲の明るさに引き寄せられて明るさが知覚される (図2(E))。これは明るさに関する空間統合メカニズムを導入して説明される。同じ視覚系で、明るさに関して対比 (分節化) と同化 (統合) の両方が起こる。この矛盾を解決するために、対比と同化のそれぞれに最適な刺激サイズが異なっているという説明が与えられた<sup>11, 26)</sup>。

対比と同化は明るさに関してだけでなく、色・運動・奥行きなどの他の視覚属性においてもみられる。例えば運動では、静止した中央のパターンが周辺の運動と反対方向に動いて見える誘導運動 (induced motion) は運動の対比の現象であり (例えば、<http://psychlab1.hanover.edu/Classes/Sensation/induced/index.html> に動画デモあり)、周辺の

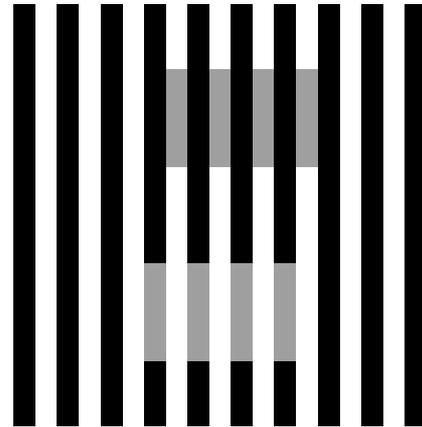


図3 ホワイト錯視。上の灰色は下の灰色より暗く見えるが、誌面上では同じ灰色である。

運動に引きずられて同一方向に動いて見える運動捕捉 (motion capture) は運動の同化の現象である (例えば、<http://www.brl.ntt.co.jp/illusionForum/v/motionAssimilation/ja/index.html> に動画デモあり)。まったく同一の刺激パターンであっても、刺激サイズが小さいときは同化、大きくなると対比の現象を生み、その間には同化から対比に転じる臨界刺激サイズが存在し、それは視野中心から刺激までの距離が遠くなるに従って大きくなった<sup>27, 28)</sup>。このことから、視覚系には運動に関して拮抗受容野があつて、空間的な差分運動の検出に寄与している可能性が示唆される。またその処理サイズは、高次視覚野であるMT野の神経細胞の平均的受容野サイズが周辺視になるに従って増大する様子でよく近似された<sup>28, 29)</sup>。

明るさの対比と同化の現象から空間的な輝度の差分演算器が示唆され、われわれの理解する情報処理システムがそれにより改訂され、差分演算器が組み込まれた。そのモデルから逸脱した錯視現象が次に見つかれば、知覚研究の新たな推進力となろう。そのひとつがホワイト錯視 (White's illusion) である<sup>30)</sup>。図に示したような輝度配置であれば (図3)、刺激サイズから考えて明るさの対比が生じることが予想される。対比ならば、例えば下の灰色領域は黒領域よりも白領域と接する部分が多いので相対的に暗く見えるはずであり、同様の理由から上の灰色領域は明るく見えるはずである。しかし実際には、下がより明るく上がより暗く見える。したがって、単純な同心円状の拮抗受容野で明るさの差を強調する装置を組み込んだシステムでは説明できないので、錯視にうまい説明を与えるためには、システムがさらに改訂されなければならない。本現象は未解明ながら、遮蔽手がかりにより三次元シーン解析がなされた際の物体表面明るさとして錯視が見えるのだという可能性が提案されている<sup>31, 32)</sup>。

#### 4.4 順応と残効

順応パラダイムも知覚心理学では重要なツールである。何らかの視覚刺激に数十秒間曝露された後、知覚に一過性の変更が生じる。そうしたなら、少なくともその視覚刺激の処理に関連しておりしかも可塑性のある何らかの装置が脳内に存在する証拠になる。脳はあらゆる部位において可塑性をもちうるといえども、その可塑性が例えば右に傾いた縞を長時間見た後に垂直の縞を見ると左に傾いて見えるというように特異的な変数軸上で見えがシフトするという形で顕れたならば、その変数の処理にかかわるメカニズムが叩かれていることになる。しかもその効果が順応した網膜部位に特異的に生じたならば、その処理メカニズムは網膜部位情報の保存されたレチノトピーのある中枢に存在しているだろう。しかも例えば順応刺激とテスト刺激の色やテクスチャーが似たようなときにしか方位順応の効果が起こらないというように、(先ほどの特異的な変数軸と直交した)何らかの軸上の同調性を示すならば、2番目の軸上の特定の値に同調して1番目の軸上の処理にかかわるレチノトピーを保ったメカニズムが可塑的なふるまいを一過性に示していることになる。運動残効 (motion aftereffect) はまさにそうした特異性を示す錯視の典型例である (例えば、<http://lite.bu.edu/vision-flash10/applets/Motion/Waterfall/WaterfallSimple.html> に動画デモあり)。左方向運動を観察し続けた後に静止刺激を見ると反対の右方向に動いて見え、その効果は順応した網膜部位に特異的であり、かつ空間周波数に同調性がある順応刺激とテスト刺激との周波数が近いほど効果が大きい<sup>33)</sup>。またこの現象では見えの動きが順応時と反対方向にシフトするが、見えの位置はシフトせず、いわば純粋な運動印象が知覚されるというのが教科書的説明である。位置処理と運動処理が基本的に独立に行われること、運動処理とは天秤のような左右や上下のバランスをみていちばん「重い」方向を知覚運動方向とすること、そのようなメカニズムは視野の場所ごとに周波数帯域ごとに多重スケールで多数共存している局所的な運動検出装置であることなどが、この現象をさまざまな条件で体験することにより推定できる<sup>34)</sup>。

相異なるふたつの知覚が共通経路の処理を経ているかどうか、順応実験を通して調べることができる。例えば上述の運動残効では、白黒縞模様など輝度で定義されたいわゆる一次運動で順応した後、静止した白黒縞模様が動いて見える。これを変えて、コントラストの高低で縞模様をつくりこの縞を動かすと、やはり運動が見えるが、これをコントラスト定義の二次運動と呼ぶ<sup>35)</sup>。これに順応した後で先ほどと同じく静止した白黒縞模様にやはり運動残効が

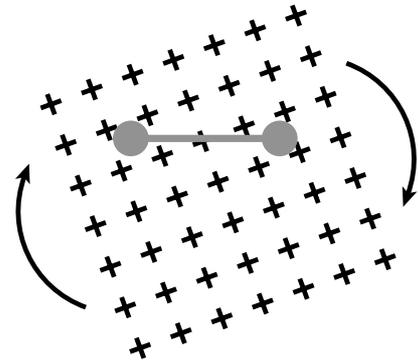


図4 運動誘導発盲。任意のパターン（この例では十字模様の羅列）を回転などして運動させると、それと重なって呈示された物体（この例では垂鈴型の図形）が数秒で消失したり再出現したりして感じられる。

生じれば、一次運動と二次運動とは同一メカニズムに変化を及ぼしたことになり、共通経路を通っている証拠になる。結果は逆で、二次運動ではこの場合は運動残効はまったく起こらない<sup>36)</sup>。では、二次運動は運動処理とは一切無関係な、例えば画像の特徴点の位置変化を注意して追いかけることで見える現象なのだろうか？ そうでもないらしい。二次運動での順応後、静止刺激でテストするのでなく、時間的に位相反転を続ける縞模様でテストしてみる。通常この刺激は等確率で左にも右にも動いて見えるのだが、順応後、順応方向と反対方向への知覚がより多く生じるようになった。ここから、一次運動と二次運動とはどちらも運動に特異的だが相異なる処理経路を介していることがわかる。

#### 4.5 アウエアネス

周辺や過去の刺激に影響されて知覚が変容するよりもさらにショッキングな出来事として、あるはずのものがなくなってしまう錯視も興味深い。運動誘導発盲 (motion induced blindness) と呼ばれる現象では (例えば、[http://www.michaelbach.de/ot/mot\\_mib/](http://www.michaelbach.de/ot/mot_mib/) に動画デモあり)、その上に運動物体を重ねて呈示することにより、静止物体がふと見えなくなってしまう (図4)。網膜には依然として静止物体は投影され続け、長時間露光や運動物体によるマスキングの効果で闕下になるとも考えられない高コントラストのはっきりしたものであっても、意識の上からは静止物体が数秒間で全体として消失し、数秒間たつと再び現れ、また消失する<sup>37)</sup>。「物体」という言葉をあえてここで使っているのはこのように物体単位で生じるように思われる錯視であるからで<sup>38)</sup>、視覚信号の局所画像処理しか仮定していないシステムではこの現象を説明できないだろう。視野の中の何かをひとつの物体として切り出し、別の何かを別の物体とし、そのうちのいずれかを意識にのぼらせたりのぼ

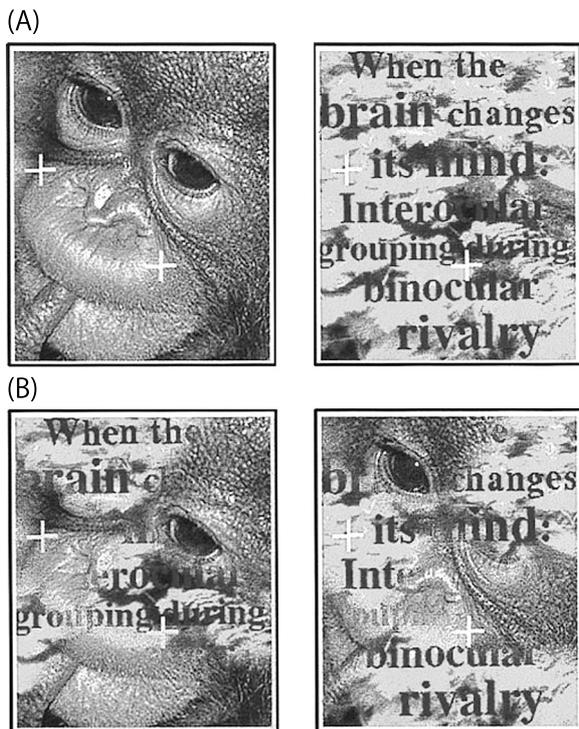


図5 両眼視野闘争の例。(A)左側の像を左眼に、右側の像を右眼に入れて、両眼観察すると、2つの像が数秒間隔で知覚交替して見える。(B)左眼像と右眼像とを図のようにパッチワーク状にして、両眼観察すると、知覚交替は(B)に示す左眼像と右眼像との間で生じるのではなく、あくまで(A)に示すような2つの画像の間で生じるように感じられる。ただし、白黒画像では観察しにくい。実際には色がついており、動物の顔の画像は全体に暖色系であった一方、文字列の側の画像はジャングルの緑色の上に青字が描かれていたので、形状やテクスチャーなどの属性だけでなく色の属性を重要な要因として両画像間の闘争が生じていた。Reprinted by permission from Proc. Natl. Acad. Sci. USA, vol. 93, no. 26, pp.15508-15511, copyright © (1996) National Academy of Sciences, U.S.A.

らせなかつたりするメカニズムを想定する必要がある。

視野上の同一部位に2つの物体が位置を占めて競合するもうひとつの例が、両眼視野闘争(binocular rivalry)である(図5(A))。視野の同じ場所に、例えば左眼には動物の顔、右眼にはジャングルの風景というように、両眼間で対応しない画像を呈示する。すると左右眼像が融像して見えることはなく、時々刻々、左眼像だけあるいは右眼像だけが見える。見えないほうの図形は入力され続けているにもかかわらず、意識の上からは閉め出されておき、数秒間隔で左眼像と右眼像とが知覚交替する。また、左眼像では図形X、右眼像では図形Yを出してから、図形XとYとを左右眼間で切り替えて、このように素早く反転させ続けた状態で両眼観察すると、やはり図形Xの完全像と図形Yの完全像とが視野闘争して数秒間で知覚交替する<sup>39)</sup>。もし左眼像なら左眼像だけが見えていたとすれば画面切り替えと連

動して素早く知覚交替し続けるはずだが、そうはならない。さらに、入力画像を複数場所に切り刻んで、ある場所において左眼像では図形X、右眼像では図形Yの一部分が呈示され、別の場所ではその逆にして、単眼像だけを見ると図形Xと図形Yとのパッチワークになっているものを両眼呈示すると(図5(B))、やはり図形Xの完全像と図形Yの完全像とが視野闘争して数秒間で知覚交替する<sup>40)</sup>。左眼と右眼のどちらが勝つかでなく、脳内で構成された図形XとYの脳内表現のどちらが勝つか、というのが視野闘争の本質であるらしい。どこにそのような表現があり、何のために、どのような機序で、切り替わりが起こっているのだろうか。その問いに直接答えるためには、脳の内部にアクセスするのが早道である。

## 5. 脳活動研究と錯視

両眼視野闘争の事態において脳活動記録を行えば、脳の階層構造のいずれにおいて視野闘争の対応物が存在するかを明らかにできる。サル脳の単一ニューロン活動記録において、両眼性応答を示すニューロンから記録をする。例えば左眼像は記録中のニューロンにとっての選好刺激に、右眼像は非選好刺激にして、同時呈示し、記録中のサルには自分の見えている図形を行動的に回答させる。その結果、一次視覚野では視野闘争に対応する活動は起こっておらず、高次領野に行くにつれて闘争らしいふるまいを示すことがわかった<sup>41)</sup>。特に腹側経路で物体表現に深くかかわるとされる下側頭皮質ニューロンで、サルの知覚と連動して応答強度が変わった<sup>42)</sup>。ヒト脳機能イメージングでも、被験者に顔の写真と家の写真を両眼視野闘争事態で呈示して、どちらが見えるかを答えさせながら脳活動を計測した結果、顔認知にかかわるとされる紡錘状回顔領野(fusiform face area; FFA)で被験者の知覚交替と連動して賦活が変化し、顔が見えると被験者が答えた時刻に大きく活動した<sup>43)</sup>。

これらの実験で重要なのは、入力画像はまったく変えていないながら、観察者の意識上に何が浮かぶかによって脳活動が変化するということである。刺激駆動的に情報処理が進む様子をモデル化しただけの処理システムを仮定する限り、このような挙動を説明できない。システム内部の「状態」が遷移したり、上位の系から制御信号が下りてきたり、というように、意識の移り変わりに対応する何らかのメカニズムを導入しなければならない。このように、両眼視野闘争のように刺激と知覚とが極端に乖離する(刺激が一定なのに知覚が切り替わる)事態は、意識の神経相関(neural correlate of consciousness; NCC)を追い求めるの

に格好の素材となる<sup>44)</sup>。

刺激と知覚とが乖離する事態という、錯視一般がまさにそれに該当する。いろいろな錯視を脳活動研究の現場に乗せてやると、NCCに多方面から迫れそうだ。例えば運動残効では、止まっているはずのものが動いて見える。例えば知覚的充填では、盲点内部には入力欠損しているが、場合によって白に見えたり青に見えたりテクスチャーが充填したりして見える。そうした見えが生じている際の脳活動を調べれば、見えの動きの神経対応<sup>45,46)</sup>、見えの充填の神経対応<sup>47)</sup>、その他さまざまな対応物がさまざまな領域で特異的に見つかるのではないか。そのような目的意識で近年の高次脳機能研究が進んでいるのは間違いない。

誌面の都合で触れられなかったトピックスのうち、計算論アプローチに少しだけ触れたい。脳の情報処理システムを数式化して計算機に実装し、数々の知覚検出課題をわれわれ人間と同じ成績で行えることや、われわれが体験する数々の錯視と同じものを出力できることを目指す。逆に、モデルが妥当であれば当然生じるであろう錯視を、モデルの側から提案して、人間でそれが実際に生じるかを検証することも可能であり、結果に基づいてモデルを改訂することもできる<sup>48)</sup>。

錯視とは、システムの内部状態をデバッグするための素材である。特定の組み合わせのデータを入れて、変な出力が出てきたら、それはシステムの挙動を外部からチェックする側にとって非常に有用な情報である。計算神経科学者は自身のモデルにこれを適用する。電気生理学者は研究対象の脳にこれを適用する。知覚心理学者は自分自身の視覚系にこれを適用して、日々新しい錯視を発見することに科学的な喜びを見出している。

## 文 献

- 1) 北岡明佳: Newton 別冊 脳はなぜだまされるのか? 錯視完全図解 (ニュートンプレス, 2007).
- 2) 村上郁也: “錯視から分かる脳の情報処理”, 電子情報通信学会誌, **91** (2008) 809-815.
- 3) R. L. Gregory: “Distortion of visual space as inappropriate constancy scaling,” *Nature*, **199** (1963) 678-680.
- 4) L. Spillmann, T. Otte, K. Hamburge and S. Magnussen: “Perceptual filling-in from the edge of the blind spot,” *Vision Res.*, **46** (2006) 4252-4257.
- 5) P. J. Bex, G. K. Edgar and A. T. Smith: “Sharpening of drifting, blurred images,” *Vision Res.*, **35** (1995) 2539-2546.
- 6) R. L. Gregory: *Eye and Brain*. 近藤倫明, 中溝幸夫, 三浦佳世 (訳), 脳と視覚—グレゴリーの視覚心理学— (ブレーン出版, 1998/2001).
- 7) C. Enroth-Cugell and J. G. Robson: “The contrast sensitivity of retinal ganglion cells of the cat,” *J. Physiol.*, **187** (1966) 517-552.
- 8) F. Kingdom and B. Moulden: “A multi-channel approach to brightness coding,” *Vision Res.*, **32** (1992) 1565-1582.
- 9) D. C. Burr: “Implications of the Craik-O'Brien illusion for brightness perception,” *Vision Res.*, **27** (1987) 1903-1913.
- 10) S. M. Williams, A. N. McCoy and D. Purves: “An empirical explanation of brightness,” *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **95** (1998) 13301-13306.
- 11) B. Blakeslee and M. E. McCourt: “Similar mechanisms underlie simultaneous brightness contrast and grating induction,” *Vision Res.*, **37** (1997) 2849-2869.
- 12) H. Arai: “A nonlinear model of visual information processing based on discrete maximal overlap wavelets,” *Interdiscipl. Inform. Sci.*, **11** (2005) 177-190.
- 13) 後藤俣男, 田中平八: 錯視の科学ハンドブック (東京大学出版会, 2005).
- 14) F. W. Campbell and J. G. Robson: “Application of Fourier analysis to the visibility of gratings,” *J. Physiol.*, **197** (1968) 551-566.
- 15) D. G. Pelli: “The quantum efficiency of vision,” *Vision: Coding and Efficiency*, ed. C. Blakemore (Cambridge University Press, Cambridge, 1990) pp. 3-24.
- 16) L. Spillmann: “From perceptive fields to Gestalt,” *Prog. Brain Res.*, **155** (2006) 67-92.
- 17) G. A. Gescheider: *Psychophysics: The Fundamentals*. 宮岡 徹, 倉片憲治, 金子利佳, 芝崎朱美 (訳), 心理物理学—方法・理論・応用 (上・下). (北大路書房, 1997/2002).
- 18) 岡嶋克典: 感覚・知覚実験法 (朝倉書店, 2008).
- 19) V. S. Ramachandran: “Perception of shape from shading,” *Nature*, **331** (1988) 163-166.
- 20) I. Murakami and P. Cavanagh: “A jitter after-effect reveals motion-based stabilization of vision,” *Nature*, **395** (1998) 798-801.
- 21) I. Murakami and Y. Kashiwabara: “Illusory position shift induced by cyclopean motion,” *Vision Res.*, **49** (2009) 2037-2043.
- 22) V. A. Casagrande: “A third parallel visual pathway to primate area V1,” *Trends Neurosci.*, **17** (1994) 305-310.
- 23) P. H. Schiller and N. K. Logothetis: “The color-opponent and broad-band channels of the primate visual system,” *Trends Neurosci.*, **13** (1990) 392-398.
- 24) M. S. Livingstone and D. H. Hubel: “Psychophysical evidence for separate channels for the perception of form, color, movement, and depth,” *J. Neurosci.*, **7** (1987) 3416-3468.
- 25) S. M. Anstis and A. H. Reinhardt-Rutland: “Interactions between motion aftereffects and induced movement,” *Vision Res.*, **16** (1976) 1391-1394.
- 26) X. Otazu, M. Vanrell and C. A. Párraga: “Multiresolution wavelet framework models brightness induction effects,” *Vision Res.*, **48** (2008) 733-751.
- 27) M. Nawrot and R. Sekuler: “Assimilation and contrast in motion perception: Explorations in cooperativity,” *Vision Res.*, **30** (1990) 1439-1451.
- 28) I. Murakami and S. Shimojo: “Motion capture changes to induced motion at higher luminance contrasts, smaller eccentricities, and larger inducer sizes,” *Vision Res.*, **33** (1993) 2091-2107.
- 29) I. Murakami and S. Shimojo: “Assimilation-type and contrast-type bias of motion induced by the surround in a random-dot display: Evidence for center-surround antagonism,” *Vision Res.*, **36** (1996) 3629-3639.
- 30) M. White: “A new effect of pattern on perceived lightness,” *Perception*, **8** (1979) 413-416.
- 31) B. L. Anderson: “A theory of illusory lightness and transparency in monocular and binocular images: The role of contour junctions,” *Perception*, **26** (1997) 419-453.
- 32) D. Corney and R. B. Lotto: “What are lightness illusions and

- why do we see them?" *PLoS Comput. Biol.*, **3** (2007) 1790–1800.
- 33) E. L. Cameron, C. L. Baker, Jr. and J. C. Boulton: "Spatial frequency selective mechanisms underlying the motion aftereffect," *Vision Res.*, **32** (1992) 561–568.
  - 34) G. Mather: "The movement aftereffect and a distribution-shift model for coding the direction of visual movement," *Perception*, **9** (1980) 379–392.
  - 35) P. Cavanagh: "Short-range vs long-range motion: Not a valid distinction," *Spat. Vis.*, **5** (1991) 303–309.
  - 36) S. Nishida and T. Sato: "Motion aftereffect with flickering test patterns reveals higher stages of motion processing," *Vision Res.*, **35** (1995) 477–490.
  - 37) Y. S. Bonnef, A. Cooperman and D. Sagi: "Motion-induced blindness in normal observers," *Nature*, **411** (2001) 798–801.
  - 38) S. R. Mitroff and B. J. Scholl: "Forming and updating object representations without awareness: Evidence from motion-induced blindness," *Vision Res.*, **45** (2005) 961–967.
  - 39) N. K. Logothetis, D. A. Leopold and D. L. Sheinberg: "What is rivalling during binocular rivalry?," *Nature*, **380** (1996) 621–624.
  - 40) I. Kovács, T. V. Papathomas, M. Yang and Á. Fehér: "When the brain changes its mind: Interocular grouping during binocular rivalry," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **93** (1996) 15508–15511.
  - 41) D. A. Leopold and N. K. Logothetis: "Activity changes in early visual cortex reflect monkeys' percepts during binocular rivalry," *Nature*, **379** (1996) 549–553.
  - 42) D. L. Sheinberg and N. K. Logothetis: "The role of temporal cortical areas in perceptual organization," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **94** (1997) 3408–3413.
  - 43) F. Tong, K. Nakayama, J. T. Vaughan and N. Kanwisher: "Binocular rivalry and visual awareness in human extrastriate cortex," *Neuron*, **21** (1998) 753–759.
  - 44) F. Crick and C. Koch: "A framework for consciousness," *Nat. Neurosci.*, **6** (2003) 119–126.
  - 45) R. B. Tootell, J. B. Reppas, A. M. Dale, R. B. Look, M. I. Sereno, R. Malach, T. J. Brady and B. R. Rosen: "Visual motion aftereffect in human cortical area MT revealed by functional magnetic resonance imaging," *Nature*, **375** (1995) 139–141.
  - 46) A. C. Huk, D. Ress and D. J. Heeger: "Neuronal basis of the motion aftereffect reconsidered," *Neuron*, **32** (2001) 161–172.
  - 47) J. D. Mendola, I. P. Conner, S. Sharma, A. Bahekar and S. Lemieux: "fMRI measures of perceptual filling-in in the human visual cortex," *J. Cogn. Neurosci.*, **18** (2006) 363–375.
  - 48) S. Satoh and S. Usui: "Computational theory and applications of a filling-in process at the blind spot," *Neural Netw.*, **21** (2008) 1261–1271.

(2009年8月28日受理)