

## 錯覚と眼球運動と視野安定

村上郁也

### 1. 錯覚

錯覚は面白い。見せているものと違うものが見え、聞かせているものと違うものが聞こえるように感じられる。その錯視や錯聴の現象の表面的な面白みから、錯覚を用いた数々のショービジネスも運営されているし、心理学関連の学協会の主催・共催で錯覚コンテストなる催しさえ開かれたりする。子どもから大人まで誰でも楽しめる。

しかし、錯覚とはショーやコンテストの娯楽に資する以上の重要性をもっている。アカデミアの中にあっただおセンス・オブ・ワンダーをかきたてる具材であるからこそ、古今東西の学者が盛んに錯覚現象を発見して研究対象としてきたのである。例えば筆者の専門領域である運動視知覚の分野には「運動残効」ないし「滝の錯視」と呼ばれるものがあり、上から下へ動く模様を見続けた後で静止図形を観察すると下から上へ動いて見えるという現象だが、これに関して古くはギリシア哲学のアリストテレスがその現象記述に類するものを遺している(Mather et al, 1998)。レオナルド・ダ・ヴィンチも風景と網膜像と知覚される視覚世界との間の関係にいたく興味をもっていた。19世紀生理学の巨人フォン・ヘルムホルツは彼の膨大な研究著作の一部として、錯覚現象を題材にして脳の計算理論を世界に先駆けて提案した。

というわけで、錯覚は心理学者をはじめとする研究者にとっての重要な研究ツールなのである(村上, 2008, 2010)。錯覚のどこが研究ツールとして魅力的なのだろうか。それは、「脳をだます」という作業の入力と出力の関係の不思議さにある。脳は、錯視図形だろうが日常世界の入力画像だろうがそれが入力されたならばとにかく計算作業を始める。その計算作業とは、宿命的に貧弱でノイズに汚された2次元網膜像を利用して、リッチな外界3次元構造を可能な限り正しく、つまり私たちが生きていく上で使い勝手のよい知覚表象となるべく、推定しようとする作業である。その過程で、「脳がだまされる」結果、錯視が生じる。しかしそこには、だます/だまされるという言葉遣いで表現される以上の何かがある。むしろ、計算プログラムのデバッグ作業や、犯人特定の捜査作業に通じるものがある。鉛筆や自転車や群衆や、といった通りいっぺんの入力画像情報を入れているだけでは、私たちの視覚システムは頭がよすぎるので、そこに鉛筆や自転車や群衆がある、という正しい解答を即座に出してしまう。それは通りいっぺんの数字を入れると当該計算プログラムが見た目正しく動作したり、通りいっぺんの訊問をすると被疑者が正しい供述をしたり、というのと同形である。被疑者が事件の犯人かどうかを推定するためにはそのための特別な裁決質問を問い、そのときの反応を見なければならない。計算プログラムにバグがあるか検査するためには境界条件の数字を入力し、誤作動しないかチェックしなければならない。それと同じく、錯視図形を入力し、それを視覚システムが計算した結果、予期せぬ出力が万人において同じように結果する、そのような入力と出力の不

思議な関係を手中にして初めて、研究者はシステムの計算原理を推定することが可能になる。「なぜだまされたのか」、そして、それなら「ふだんはどう動いているか」を論じることができるのである。

## 2. 眼球運動

錯覚とは日夜稼働している視覚システムをデバッグするための有用なツールであると述べた。私たち生体内の視覚関連ではもうひとつ、日夜稼働しているシステムがある。それはとりもなおさず、眼球運動システムである。

眼球運動には随意的なもの和不随意的なものがある。随意的なもの代表には、静止点から静止点へと眼をジャンプさせるサッカードと、滑らかに運動する対象を眼で追いかける追跡眼球運動がある。不随意的なものには、視野内の広い領域に呈示された運動図形を追いかけるかのような反射である視運動性反射と、頭部を回転すると反対方向に眼が回転する反射である前庭眼反射が主に挙げられ、これらは自分自身の動きに伴う像のブレを防ぐフィードバック制御として重要である（村上, 2011）。

もうひとつの種類の不随意的眼球運動として筆者が近年注目してきたのが、固視微動である。固視微動とは、眼を止めていると思っても知らないうちにいつも揺れているという眼球運動で、粗いものから細かいものまで数種類に分けられる。固視微動はヒトだけでなく、サルやウサギやカメなどといった他の脊椎動物、また固視微動様の揺れは無脊椎動物にまで広範に観察される（Martinez-Conde et al., 2004）。

固視微動の特徴として、随意的に止めることはできず、静止対象をじっと見つめている固視中にも常に微小に眼が揺れていること、その揺れに伴う網膜像運動から視覚神経細胞の光応答が生じること、がある（Murakami, 2006）。では、なぜ、固視微動などというものが存在しなくてはならないのだろうか？なぜ、固視微動に伴う視覚応答があるにもかかわらず私たちの視覚世界は揺れて見えないのだろうか？

第一の問題に答えるために最もよい実証実験は、固視微動を止めてみて何がどうなるか観察することである。薬理的に眼の筋肉を麻痺させることも可能だが、それより安全・安心に心理学研究ができる古典的方法として、静止網膜像という実験事態がある。呈示画像が眼球運動にかかわらず眼の同じ位置に投影され続けるようにする方法で、投影装置をつけたコンタクトレンズを観察者が装着する方法や、眼球運動測定装置の計測データに連動して画像呈示位置を更新する方法などがある。いずれにせよ、完全な静止網膜像を作り出したならば、劇的な知覚体験をすることができる。すなわち、網膜像としては投影され続けているはずなのに、しばらく観察するうちに図形が意識から消えてしまうのである。

したがって、固視微動の代表的機能とは、固視の最中に静止外界を観察しているときに、風景が意識から消失してしまうのを避けるために、あえて眼を微小に震わせているのだ、ということになる。最近では、視覚検出感度を高めるための適応的運動であるという実験データも出

されており、固視微動が眼球運動システムの雑音などではなく視覚システムにとって重要な機能を担っているのだとする証拠がますます挙がっている (Rucci et al., 2007)。

ちなみに、日常的な場面では静止網膜像を作り出すことはできないが、それを模擬する実験は可能である。トロクスラー効果と呼ばれる錯覚現象がそれで、固視をしながら、視野周辺で、背景と明るさを同じにした円図形などでその輪郭を空間的にぼかしたような図形を観察する。すると、長時間観察しているうちに、ぼけた図形がだんだん見えなくなり、その領域が背景色で消されて充填してしまうように見える。視野周辺はもともと視力が弱いという、背景と明るさが同じである図形はいつそう輪郭が見えづらいため、少々眼が動いてもそれによる像の位置変化は視覚システムにとって検出されないのだ、事実上の静止網膜像になるのだ、と解釈することができる。

ここまでの話から、静止網膜像は背景に溶けこむ、だから、固視微動で静止網膜像を防ぐ、という筋道が見えてくる。

### 3. 安定視野

それでもまだ、第二の問題は解かれていない。静止網膜像を防ぐためにわざと揺れているその眼の揺れに伴い、網膜像が揺れているという事実を、視覚システムは入手してしまい、眼の動きに連動した視覚神経細胞の応答が起こっている。いわば、脳の中で像が揺れているのと同じことである。それなのになぜ、健常者であるならば、眼前の視覚世界は眼の動きに伴って全体的に揺れて見えず、悠然平らかに安定しているかのように見えるのだろうか？

そもそも、眼の動きに伴って動いてしまう網膜投影像から安定した視覚世界を作り出すという課題は、固視微動に限らずあらゆる眼球運動についてまわる問題である。例えば、走る自動車を眼で追いかけている場合などは、網膜上では自動車以外の風景すべてが眼の動きと反対方向に流れていく。このときは、自分で眼をどのくらい随意的に動かしているかということを脳は知っているので、自分の発した運動指令を計算に入れて画像から差し引きすれば、安定視野を得ることができるはずである。ところが、固視微動は末梢性の運動なので、眼の動きの細かな様子までも脳がすべて把握しているということはおそらく不可能である。固視微動による像の揺れを補正するためには、入力画像そのものもつ性質を用いるしかないことになる。

筆者自身が心理学実験の実証データに基づいて提案したモデルによれば、画像中に相對運動があるかないかが、揺れ補正のキーポイントになる。まず、図1(a)のように外の世界が静止しているとする。眼が瞬間的に左下に動けば像は右上に動くが、静止物体の像はどこでも同じ方向に同じだけ動くので、相對運動は発生しない。次に、図1(b)のように静止背景上に運動物体があるとする。それを観察しているときに眼の動きによって像が全体的に動いても、背景と運動物体との間には一定の相對運動がある。このような単純な光学的關係があることを脳は知っていて、それを逆に利用することで外界の様子を正しく推定している、という考え方である。固視微動によって網膜投影像がいくら動いていても、相對運動がないかぎり「眼が揺

れているせいなのだろう、本当は外界は静止しているはずだ」と脳は解釈し続け、相対運動があるところだけ「そこに運動物体があるはずだ」と解釈する、というわけである。

このような脳内の補正メカニズムを実験的にだましてしまうと、固視微動に伴う像の揺れが意識にのぼってしまう、ということ、視覚実験研究を通じて筆者らは発見した (Murakami & Cavanagh, 1998, 2001)。図2(a)のように同心円状の領域を設け、中心部分には静止パターン、周辺部分には点滅パターンを呈示して、1分程度観察し続ける。固視微動している眼の網膜にはこの図形は常に揺れながら映っているが、点滅パターンは運動検出回路を狂わせる作用があるので、脳にはこの部分が網膜上で揺れていることがやがてわからなくなる。その結果、図2(b)に示すように、すべてが静止しているテスト図形を後で観察すると、中心部分のみが相対的に揺れているかのように脳は感じるため、揺れの実際の原因が固視微動であるにもかかわらず、中心部分がゆらゆら揺れているように知覚されてしまうのである。しかし逆にいえば、こうでもしなければ通常はそのような眼ぶれがまったく意識されないということなので、脳の情報処理がいかに優れているかがわかる。

そして、そのように画像中の相対運動の有無によって神経発火の挙動を変える神経細胞も、数々発見されている (Ölveczky et al., 2003)。固視微動様の像の動きを網膜上の局所にだけ起こしてやると、視覚神経細胞が連動して発火する。しかしながら、その運動画像とともに、それと同期して動く画像をその周辺にも呈示してやると、同じ視覚神経細胞が発火をやめてしまうのである。これはさながら、全体的に同じようにゆらゆらと揺れている入力画像に対して視覚神経細胞が「眼が揺れているせいなのだろう、発火しても無駄だ」と判断しているかのようである。

ここまでの話から、静止網膜像は背景に溶けこむから固視微動で静止網膜像を防ぐのだが、それと同時に、脳内にあるいわば「眼ブレ補正」回路を用いて安定視野を得ているのだ、その回路の動作特性とはおそらく画像中の運動信号の中に相対運動があるかないかで判断を変えるような仕組みになっているのだ、と考えることができる。

#### 4. 錯覚と眼球運動と視野安定

最後に、強烈に面白い錯覚であって、それに眼球運動が関わっていることがわかり、おそらく上記の視野安定の方略とつながるであろう、もうひとつの例を挙げることにする。それは「蛇の回転」である (<http://www.psy.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/>)。

「蛇の回転」とは立命館大学の北岡明佳教授が考案した錯視デザイン図形で、北岡教授とは、彼の手になる膨大な量の錯視図形が、レディー・ガガの2013年新作アルバムのデザインをはじめ数々の書籍その他の媒体に採用されるなど、業界では群を抜いて有名な錯覚クリエイターである ([http://www.ritsumei.jp/news/detail\\_j/topics/12336/year/2013](http://www.ritsumei.jp/news/detail_j/topics/12336/year/2013))。「蛇の回転」とは、「黒-濃灰-白-淡灰」という微小な光強度パターンを並べることにより、そうして作られた静止図形を観察した際に、「黒-濃灰-白-淡灰」という順序の方向に、運動印象が生じるという錯覚

である。

静止図形であるにもかかわらず明瞭な運動印象が生じるということで、数々の研究者がその生成機序を模索しているが、いまだ結論には到っていない。筆者らは、この「蛇の回転」に見られる運動印象に必要なものが、固視微動なのではないかと考えた。静止図形をじっと見つめて観察していても、眼は止まることがないため、固視微動に連動して網膜像は必ず揺れている。通常はその揺れは「眼ブレ補正」回路によって意識から取り除かれて視野安定がもたらされるが、「蛇の回転」はその回路を誤作動させるのではないだろうか、と考えたのである。

その仮説を検証するために、筆者らは視覚実験を実施した (Murakami et al., 2006)。まず「蛇の回転」観察中の人間の眼球運動を計測しながら、錯視の強さを実験心理学の手法で測定した。固視微動の大きさのある統計指標で代表させ、横軸に固視微動の大きさ、縦軸に錯視の強さをとり、被験者間散布図をプロットすると、右上がりの傾きが得られた。すなわち、眼が揺れる人ほど錯視が強い、という相関関係が得られたのである。次に、同一被験者に繰り返し観察してもらいながら、画像そのものを固視微動のような揺れ方で揺らし、錯視の強さを測定して、横軸に固視微動様の揺らし量、縦軸に錯視の強さをとってプロットすると、やはり右上がりの傾きが得られた。すなわち、人工的に揺れを操作した結果、画像を網膜上で大きく揺らすほど錯視が強くなる、という因果関係すら得られたのである。さらに、静止網膜像の簡易版として「蛇の回転」図形の残像を網膜にやきつけたところ、残像にはまったく錯覚は観察されなかった。網膜上で揺れていないと錯覚は起こらない、という関係である。

上に URL を示した web サイトを閲覧された読者には理解できるように、「蛇の回転」とは、「黒 - 濃灰 - 白 - 淡灰」という光強度パターンが局所的にさまざまな方向に向いているように作られている。それらが網膜上で一緒に揺れている。何らかのメカニズムによってその網膜像運動を情報源にしてそれらを増幅してしまうようなことが生じた場合、画像自体は瞬間的に同じ方向に網膜上で動いていたとしても、局所的にさまざまな方向に運動が出力されてしまうことになると考えられる。局所的にさまざまな方向の運動が同時存在するとしたときにその様子を整合的に解釈する際に、「眼が揺れているせいではありえない、外界の対象が動いているに違いない」としてしまい、運動錯覚が生じてしまうのだ、というのが筆者らの理論である。

私たちが日常の暮らしを営む最中、筆者を含めておそらく誰も気にも留めていないが、今この瞬間も生じ続けている不随意的な眼球運動、そしてそれに伴う網膜像の揺れがあることの利点（静止網膜像を防ぐこと）と欠点（像の揺れが脳内に表象されてしまうこと）、さらにその欠点を補い視野安定を得る「眼ブレ補正」の方略、それらがなくなってしまうえば、視覚機能がその瞬間に損なわれてしまうことになる。眼前からあらゆる世界が消えてしまったり、眼前であらゆる世界が揺れ続けてしまったりするのである。世界の安定のために、日夜働いている頭脳集団があるのである——サゲとしては不格好で申し訳ないが、筆者はそうした集団の情報処理様式を今後十全に解明していきたいと思っている。

## 参考文献

- Martinez-Conde, S. et al. (2004). The role of fixational eye movements in visual perception. *Nature Reviews Neuroscience*, 5 (3), 229-240.
- Mather, G. et al. (1998). *The Motion Aftereffect: A Modern Perspective*, MIT Press.
- Murakami, I. & Cavanagh, P. (1998). A jitter after-effect reveals motion-based stabilization of vision. *Nature*, 395 (6704), 798-801.
- Murakami, I. & Cavanagh, P. (2001). Visual jitter: evidence for visual-motion-based compensation of retinal slip due to small eye movements. *Vision Research*, 41 (2) , 173-186.
- Murakami, I. (2006). Fixational eye movements and motion perception. *Progress in Brain Research*, 154, 193-209.
- 村上郁也 (2008). 錯視から分かる脳の情報処理. *電子情報通信学会誌*, 91 (9), 809-815.
- 村上郁也 (2010). 視覚研究ツールとしての錯視. *光学*, 39 (2), 66-74.
- 村上郁也 (2011). 眼球運動. 北岡明佳 編 知覚心理学—心の入り口を科学する. ミネルヴァ書房.
- Murakami, I., Kitaoka, A. & Ashida, H. (2006). A positive correlation between fixation instability and the strength of illusory motion in a static display. *Vision Research*, 46 (15), 2421-2431.
- Ölveczky, B. P., Baccus, S. A. & Meister, M. (2003). Segregation of object and background motion in the retina. *Nature* 423 (6938), 401-408.
- Rucci, M. et al. (2007). Miniature eye movements enhance fine spatial detail. *Nature* 447 (7146), 851-854.

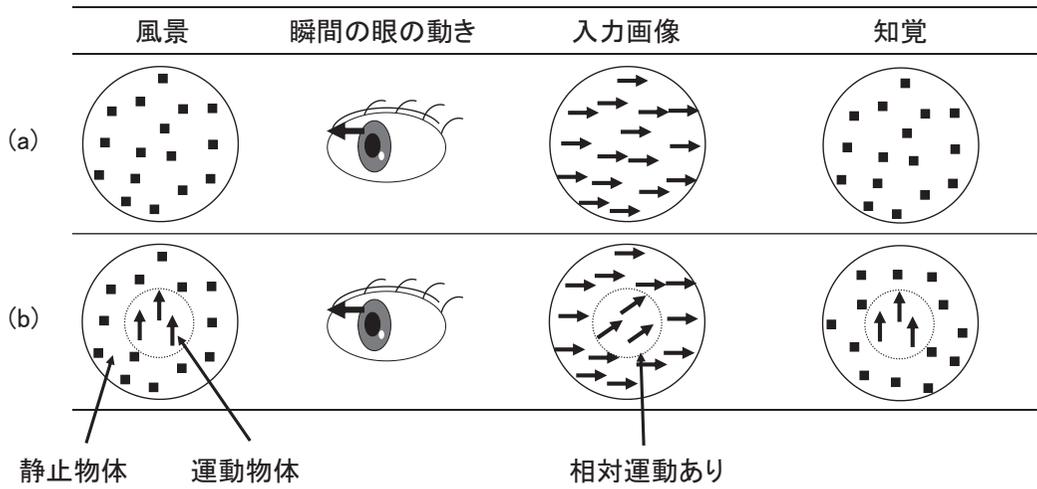


図1 固視微動に伴う像の揺れを補正する仕組み

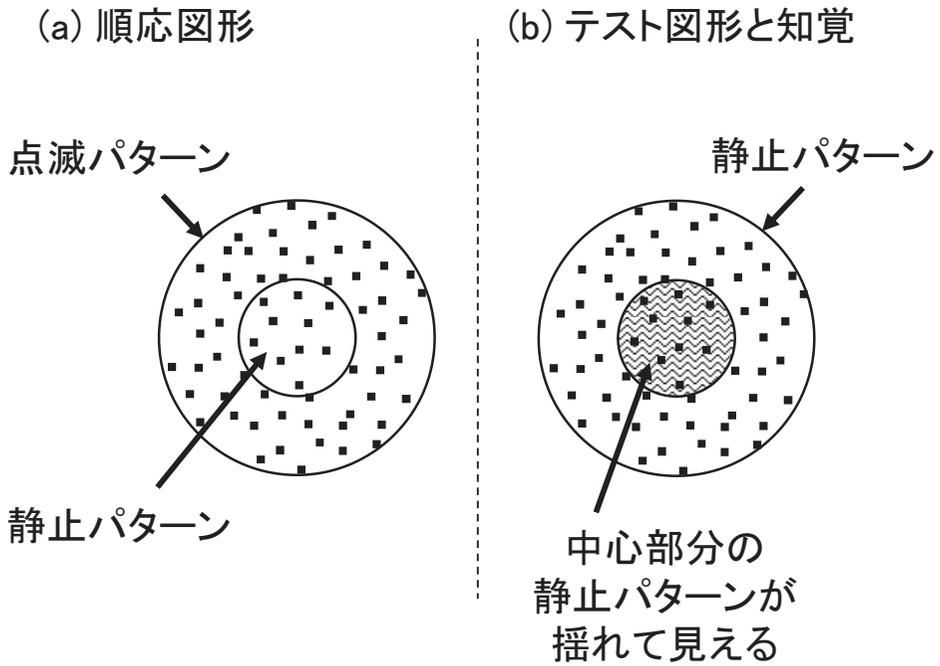


図2 固視微動由来の揺れが見える錯覚