

# 運動の知覚と錯視

北 岡 明 佳

## Motion Perception and Illusion

Akiyoshi KITAOKA

The optimized versions of the Fraser-Wilcox illusion, including the “Rotating snakes” illusion, are discussed. The direction of illusory motion depends on luminance array. Specifically, repetition of an array of black, dark gray, white, light gray, makes a stronger effect than the original Fraser-Wilcox illusion. According to pictorial characteristics, I tentatively classify the optimized Fraser-Wilcox illusion into six types, each of which consists of two components. It is suggested that these illusions should depend on miniature eye movement which serves illusory motion signals.

**Key words:** illusion, motion, eye movement

静止画なのに一部が動いて見える錯視がある。高周波・高コントラストの縞模様によるオプ効果（ギラギラした運動感）の研究は含めないことにするなら、静止画が動いて見える錯視の視覚科学的研究は、1979年のフレーザー・ウィルコックス錯視<sup>1)</sup>（図1）と1986年のシュピルマンによるオオウチ錯視<sup>2)</sup>（図2）の報告から始まった。150年の歴史のある錯視研究の中では、比較的新しい研究テーマである。

20世紀前半、ゲシュタルト心理学は、運動視は対象の位置情報に還元できない独立した視覚の要素であると考えた。20世紀後半、神経生理学によって運動視に特異的に貢献する大脳皮質ニューロンや領野の存在が明らかになった。静止画が動いて見える錯視は、実運動刺激とは異なり位置情報が変化しない刺激図形において表現される。すなわち運動情報だけを操作できるので、運動の知覚の研究においていろいろな貢献が期待できる。

### 1. 静止画が動いて見える錯視の種類

静止画が動いて見える錯視は種類が多い。大きく分類すると、画像を動かすと画像が実際とは異なる方向に動いて見える錯視と、錯視的に動く方向は画像のパターンで決まっている錯視に分けられる<sup>3)</sup>。オオウチ錯視は前者で、

フレーザー・ウィルコックス錯視は後者である。本解説では、フレーザー・ウィルコックス錯視およびその最適化された一群の錯視について解説する。

### 2. フレーザー・ウィルコックス錯視

暗から明へのグラデーション（輝度勾配のある絵）を繰り返し描くと、それがグラデーションの方向に動いて見えるという錯視である<sup>1)</sup>。フレーザーとウィルコックスは、円盤が回転して見えるようにグラデーションを配置した図を示した。彼らによれば、グラデーション上で暗から明の方向に円盤が回転して見える人、明から暗の方向に円盤が回転して見える人、どちらの方向にも回転して見えない人に分類でき、これらの個人差には遺伝性があることを示した。

1979年に発表されたフレーザー・ウィルコックス錯視はしばらく後続の研究がなく、1999年と2000年に2本の論文が出た<sup>4,5)</sup>。どちらの研究においても、グラデーション上で暗から明の方向に円盤が動いて見える人はいるが、明から暗の方向に円盤が動いて見える人はいないとした上で、諸要因の研究が進められた。偏心度はある程度大きいほうが、あるいは輝度は高いほうが錯視量は多いことなどが明らかにされた。

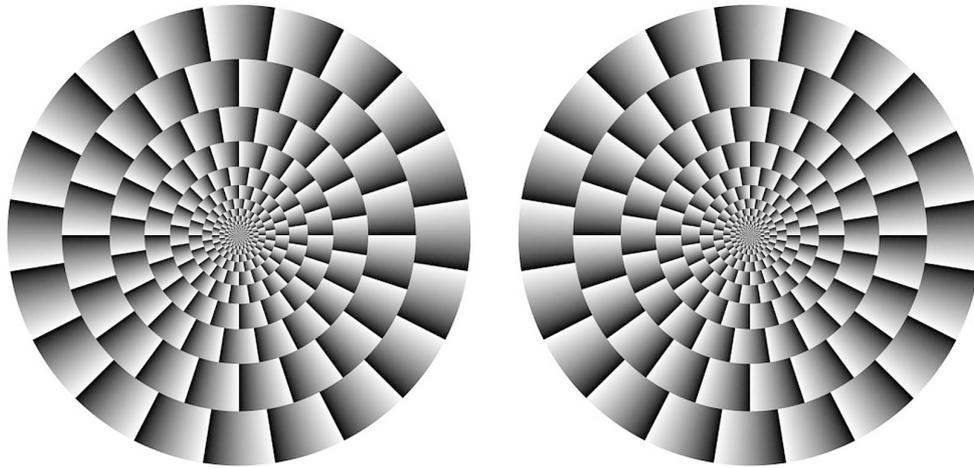


図1 フレーザー・ウィルコックス錯視。眺めているだけで、円盤が回転して見える。遺伝性のある個人差があり、左の円盤は反時計回り、右の円盤は時計回りに回転して見える人と、それらの逆方向に回転して見える人と、回転して見えない人に分かれるという。なお、本図は筆者の作図であるが、フレーザーとウィルコックスのオリジナルの図はグラデーションを渦巻状に描画した芸術作品である。

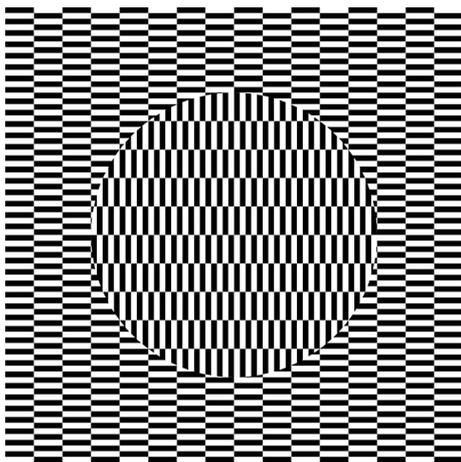


図2 オオウチ錯視（蘆田最適化バージョン<sup>1)</sup>）。内側の円内の市松模様が動いて見える。

### 3. フレーザー・ウィルコックス錯視の最適化

1999年と2000年の論文では、フレーザー・ウィルコックス錯視はグラデーション上で暗から明の方向に図が動いて見るとされたが、われわれは2003年に、暗→やや暗→明→やや明→暗という順に領域を輝度配置すると錯視量が増大することを報告した(図3)<sup>6)</sup>。これを、最適化されたフレーザー・ウィルコックス錯視と呼ぶことにする。この原理を用いた作品のひとつに「蛇の回転」(図4)がある。筆者のホームページ (<http://www.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/>) に2003年に置かれたこの作品は、インターネットを通じて知名度の高い錯視図形となった。

筆者としてはフレーザー・ウィルコックス錯視を最適化して作成したつむりの図3と図4であるが、オリジナルの

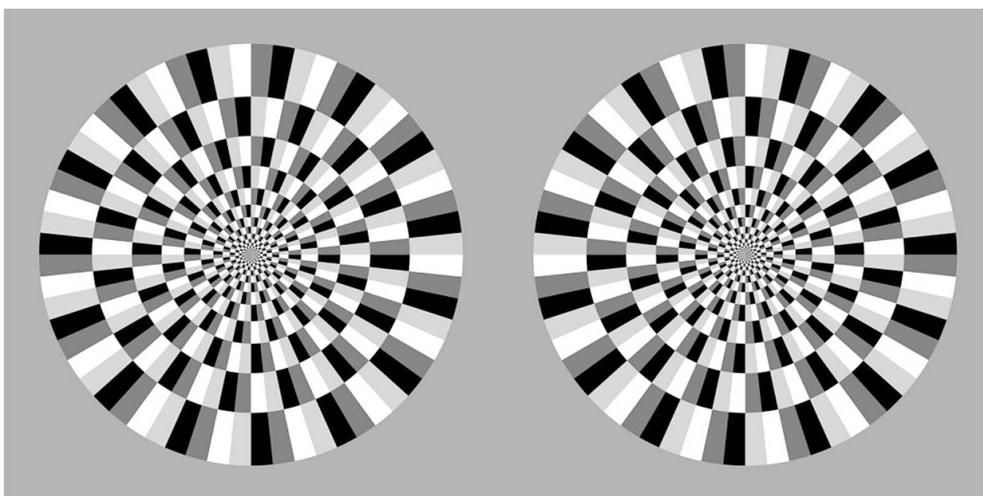


図3 最適化されたフレーザー・ウィルコックス錯視、2003年発表の最初のバージョン。黒→濃い灰色→白→薄い灰色→黒の方向に動いて見える。本図では、左の円盤は反時計回りに、右の円盤は時計回りに回転して見える。

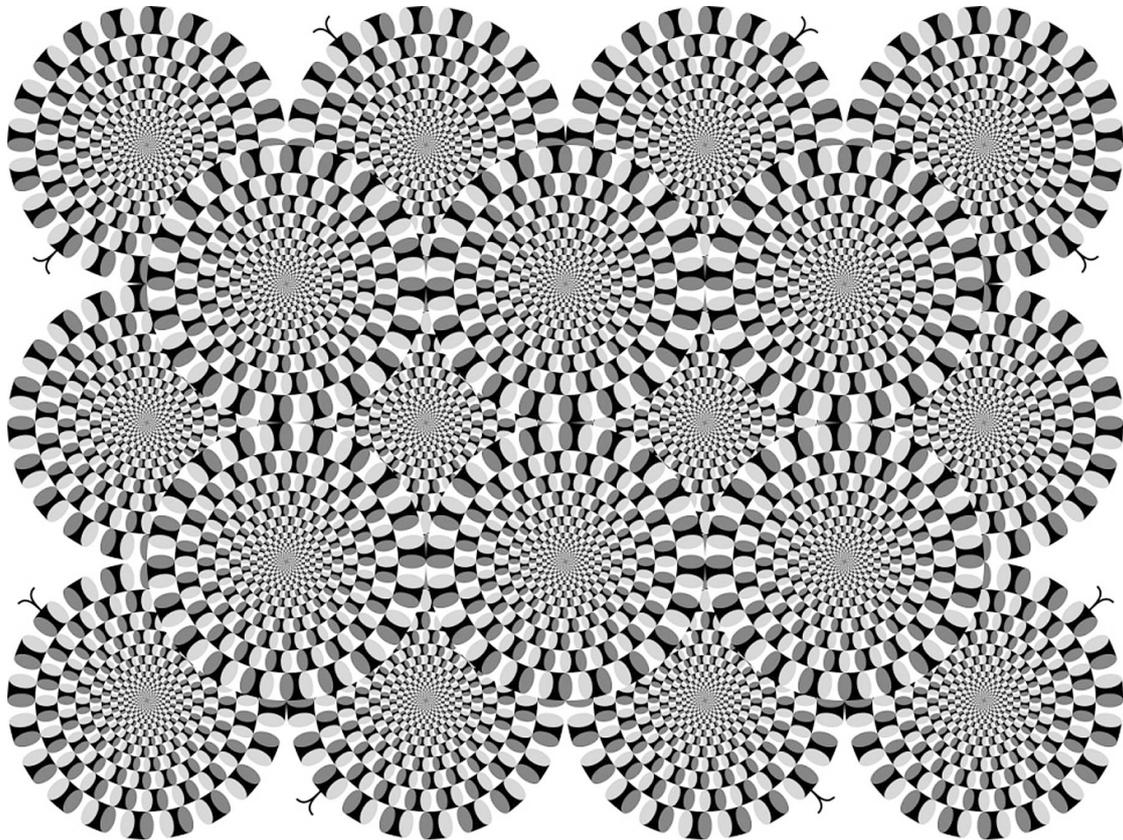


図4 筆者の錯視作品「蛇の回転」. 2003年制作. どの円盤も, 黒→濃い灰色→白→薄い灰色→黒の方向に動いて見える.

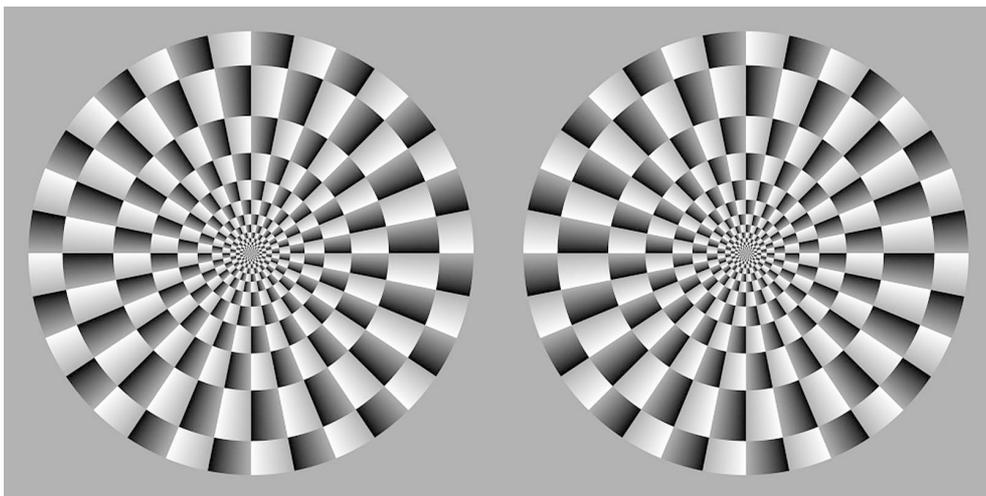


図5 グラデーションを用いて最適化されたフレーザー・ウィルコックス錯視(筆者は暫定的にタイプIと呼んでいる). グラデーション上は, 黒から灰色, 白から灰色の方向に円盤が回転して見える. 本図では, 左の円盤は反時計回りに, 右の円盤は時計回りに回転して見える.

フレーザー・ウィルコックス錯視はグラデーションで描かれているから, 異なる錯視である可能性もある. そこで, グラデーションを用いて最適化されたフレーザー・ウィルコックス錯視を作成した(図5)<sup>7)</sup>. この場合は, グラデーション上は「黒から灰色」および「白から灰色」の方向に

円盤が回転して見える. さらに, 「黒から灰色」のグラデーションと「白から灰色」のグラデーションは, それぞれ単独でも静止画が動いて見える錯視を同方向に引き起こす(図6, 図7).

フレーザー・ウィルコックス錯視は, 「黒—灰色—白」

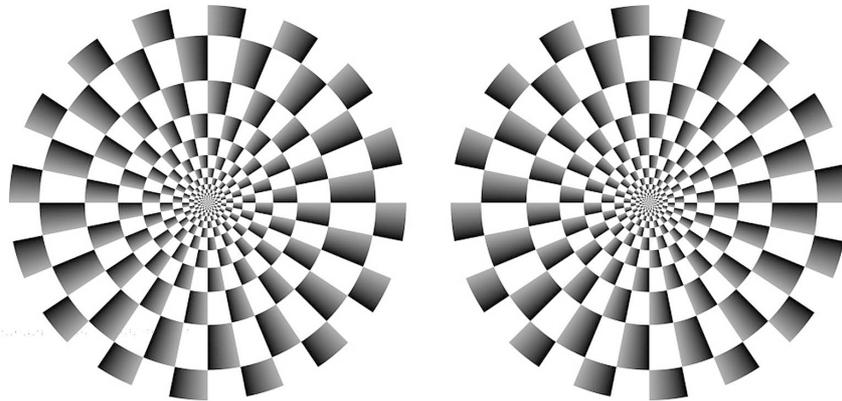


図6 グラデーションを用いて最適化されたフレーザー・ウィルコックス錯視のうち、黒→灰色の方向に動いて見える錯視図。本図では、左の円盤は反時計回りに、右の円盤は時計回りに回転して見える。

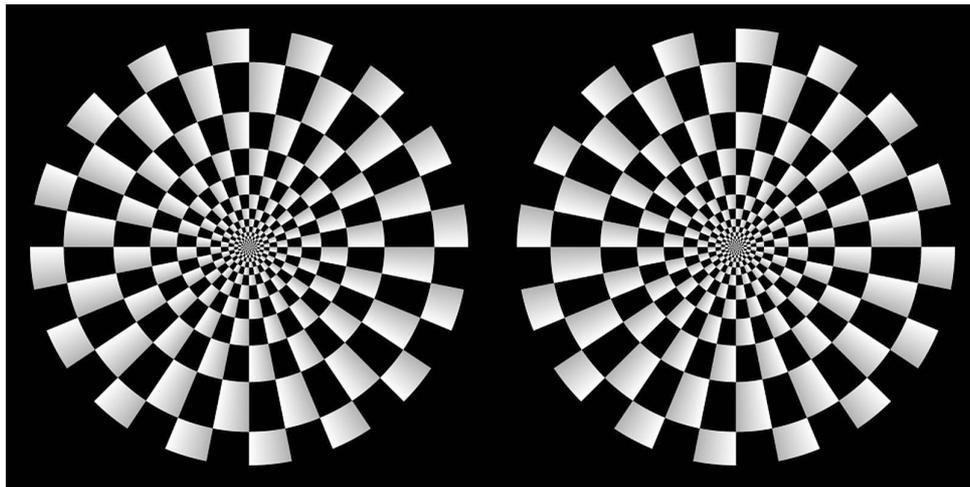


図7 グラデーションを用いて最適化されたフレーザー・ウィルコックス錯視のうち、白→灰色の方向に動いて見える錯視図。本図では、左の円盤は反時計回りに、右の円盤は時計回りに回転して見える。

のグラデーションであるから、「黒から灰色」のグラデーションによる錯視と「白から灰色」のグラデーションによる錯視が拮抗している可能性がある。すなわち、フレーザー・ウィルコックス錯視は1999年と2000年の論文<sup>4,5)</sup>で主張された「暗→明」の方向の錯視だけではなく、拮抗する「明→暗」の方向の錯視も含まれている可能性がある。そうであるならば、1979年のフレーザーとウィルコックスの論文<sup>1)</sup>で示された個人差が説明できる。すなわち、「暗→明」の方向の錯視が相対的に強かった人、「明→暗」の方向の錯視が相対的に強かった人、両方の錯視の強さが拮抗した人の3種類の被験者が参加したと考えればよいのである。

#### 4. 最適化されたフレーザー・ウィルコックス錯視の分類

筆者らは2003年にフレーザー・ウィルコックス錯視の最適化の報告の後、その基本図形（それ以上単純化すると錯視が失われる最小限のデザイン）が定まらないという事態に直面することになった。「蛇の回転」のような個々の作品もみかけが違えば基本図形だと主張すればこの問題は解決するが、不当に錯視の種類が多くなることになるのであるべく避けたい。2009年現在、筆者はこの錯視を、メカニズムではなく絵画的基準（みかけ）によって6種類のタイプ（タイプI～V（IIに2タイプある））に暫定的に分類している。それらの基本構造を図8に図説した。ただし、最近同定した色依存度の高いタイプVについては、カラーで示すことができないため省略した（例として、<http://www.psy.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/OFWtypeV.html>

	暗から明へ	明から暗へ	それぞれの輝度プロファイル
タイプⅠ			
タイプⅡa			
タイプⅡb			
タイプⅢ			
タイプⅣ			

図8 最適化されたフレーザー・ウィルコックス錯視の筆者による分類。各図においては、矢印の方向に錯視的動きが観察される。タイプⅠはグラデーション、タイプⅡは輝度の異なる3領域の配列、タイプⅢは輝度の異なる2領域の配列、タイプⅣは輝度の異なる2領域の境界が暗方向あるいは明方向になめらかに変調されたもの、ここには示されていないタイプⅤは、長波長色(赤)を基調としてそれが短波長色(青)によって変調されることで起こる色依存度の高い錯視である(「赤→暗い紫→紫」の方向と「紫→マゼンタ→赤」の方向に動いて見える錯視から成る)。

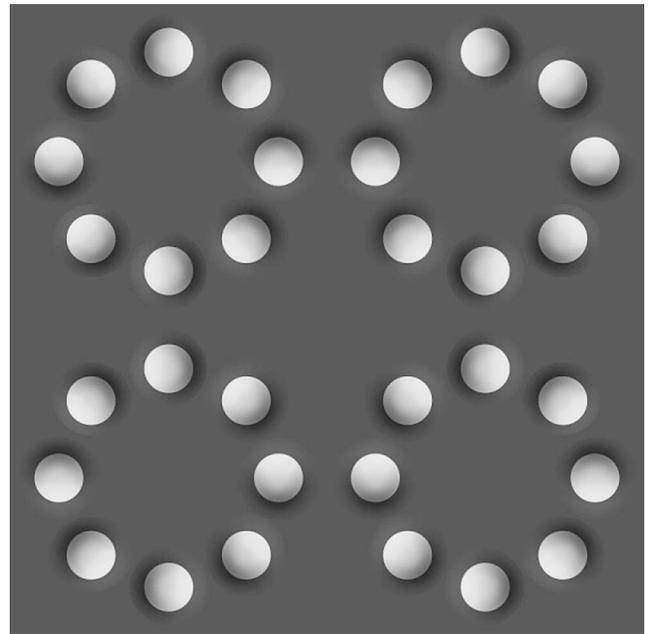


図10 陰影による立体視と共通した手がかりで表現される最適化されたフレーザー・ウィルコックス錯視・タイプⅣ。「薄い灰色→より暗く落ち込んだ部分→濃い灰色」の方向の錯視と、「濃い灰色→より明るく持ち上がった部分→薄い灰色」の方向の錯視から成る。本図では、左上と右下のリングは反時計回りに、残り2つのリングは時計回りに回転して見える。

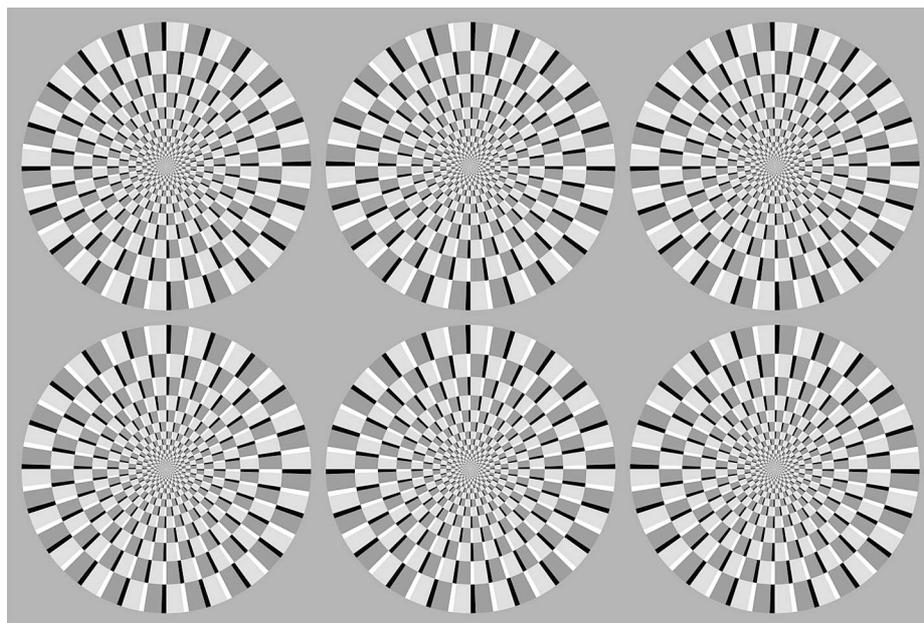


図9 基本錯視は輝度の異なる3領域から構成される最適化されたフレーザー・ウィルコックス錯視・タイプⅡa。「薄い灰色→黒→濃い灰色」の方向の錯視と、「濃い灰色→白→薄い灰色」の方向の錯視から成る。本図では、左上・右上・中央下の円盤は反時計回りに、残り3つの円盤は時計回りに回転して見える。

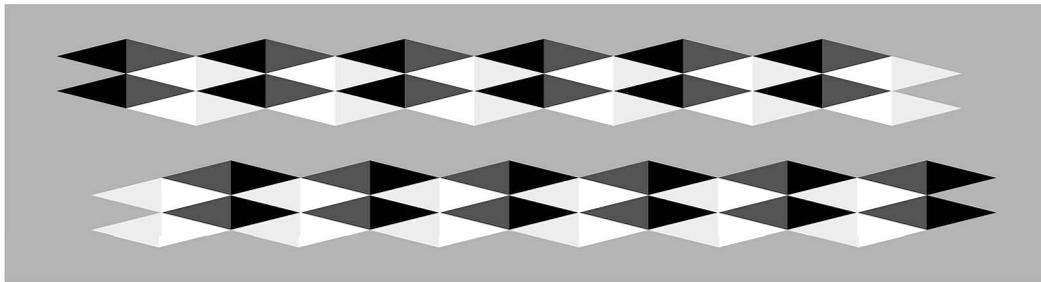


図 11 基本錯視は輝度の異なる 2 領域から構成される最適化されたフレーザー・ウィルコックス錯視・タイプⅢ。「黒→濃い灰色」の方向の錯視と、「白→薄い灰色」の方向の錯視から成る。本図では、上のブロックは右方向に、下のブロックは左方向に動いて見える。

を参照されたい)。さらに、それぞれのタイプに「暗→明」と「明→暗」と表現できるサブタイプがあるので、筆者の分類では、フレーザー・ウィルコックス錯視群は少なくとも 12 種類の基本的錯視から成るといことになる。

グラデーションで描画されるものだけをフレーザー・ウィルコックス錯視と呼ぶなら、タイプⅠの「暗→明」錯視(図 6)と「明→暗」錯視(図 7)がフレーザー・ウィルコックス錯視を構成することになる。錯視の方向はグラデーションとその周囲の輝度の関係で決まっており、「暗→明」錯視では周囲はグラデーションより輝度が高いこと、「明→暗」錯視では周囲はグラデーションより輝度が低いことが成立条件である。これは、フレーザー・ウィルコックス錯視は「コントラストが高いところから低いところの方向に動いて見える」現象であるという見方もできる<sup>8)</sup>。

一方、他のタイプは周囲との輝度の関係は必ずしも必須ではない。例えば、タイプⅡa は、輝度の異なる 2 つの領域があり、その間に両者よりも輝度の低い領域あるいは高い領域が介在している場合に、それらの輝度の関係によって動きの方向が決まる錯視である(図 9)。この意味でタイプⅡa に類似したものにタイプⅣがあるが、タイプⅣは光が当たって陰影の付いた立体物などの画像において日常的に観察される錯視である(図 10)。

タイプⅢは、黒から濃い灰色の方向に動いて見える錯視と白から薄い灰色の方向に動いて見える錯視から成る(図 11)。このタイプは周囲の輝度との関係が重要なのでタイプⅠと類似しているのであるが、直進性が高く回転錯視にすると錯視量が少ない、動き出すまでの潜在時間が長いなどの特徴がある。ただし、それらは今のところ実験的にコントロールされた知見ではない。

## 5. 最適化されたフレーザー・ウィルコックス錯視のメカニズム

これまで述べてきたように、最適化されたフレーザー・

ウィルコックス錯視は絵画的にはバリエーションが多く、錯視としての単一性が未だ保証されていないのであるが、どのタイプも中心視よりもやや周辺視で強く起こること、輝度が高いほうが錯視量が多いこと<sup>9)</sup>、錯視的動きの方向は「黒→濃い灰色→白→薄い灰色→黒」といった記述で統一できることから、最適化されたフレーザー・ウィルコックス錯視群には共通したメカニズムがあると仮定することが今のところ妥当と思われる。この仮定のもとに、最適化されたフレーザー・ウィルコックス錯視のモデルがいくつか提案されている。

提案されたモデルは大きく分けて 2 種類ある。1 つは、連続的に入力され続けているように見える画像刺激の処理は、時間的に飛び飛びの時点での網膜像が選択的に処理されると仮定し、その処理の立ち上がりと収束の過程において錯視的動きが発生するというものである(非眼球運動説)<sup>9,10)</sup>。わかりやすくいうと、「静止網膜像」あるいは「残像」が消える時に網膜座標上の場所によって消え方が違うから「仮現運動によって」動いて見えるというものである。もう 1 つは、静止画像は視覚系に対しては瞬間的な静止画像として与えられるのではなく、微小眼球運動などによって物理的に与えられた動きを含んだ画像刺激を統合する過程において、錯視的動きが作り出されるというものである(眼球運動説)<sup>11,12)</sup>。わかりやすくいうと、この錯視は刺激として網膜に与えられた何らかの運動信号が化けたものである。いわば、本当に動いて見えたものが動いて見えているだけであるというアイデアである。

われわれのモデル<sup>11)</sup>は後者に属し、微小眼球運動によって生じる網膜像運動が視覚系に入力した際に、錯視図形の輝度配置によって方向非対称的に運動信号の違いが生じることが原因であると推定する<sup>12)</sup>。わかりやすくいうと、微小眼球運動によって「黒→濃い灰色→白→薄い灰色→黒」の方向に図が動いて見えた場合に発生する運動信号は、その逆の方向に図が動いて見えた場合の運動信号より

も大きいと仮定するのである。われわれは、暗順応下においてフラッシュ光で「蛇の回転」図形を網膜に焼き付け、その静止網膜像(陽性残像)を何度も観察したが、錯視は認められなかった<sup>11)</sup> ことも、眼球運動説を支持する。

ちなみに、肉眼でも観察できる大きい眼球運動 (eye movement) としては、サッカード (跳躍眼球運動) (saccade)、(滑動性) 追跡眼球運動 (smooth pursuit)、輻輳運動 (vergence) の3種類が知られている。一方、何かを見つめている時 (固視時) にも、眼球は完全に静止しているわけではなく、小刻みに動いていることが知られており、これを微小眼球運動 (miniature eye movement) あるいは固視微動 (fixational eye movement) という。この眼球運動は不随意である。われわれのモデルでは、この錯視には固視微動が必要である。さらに、固視微動はマイクロサッカード (microsaccade)、ドリフト (drift)、トレマー (tremor) といった成分に分析できるが、われわれが錯視の原因として想定しているのはドリフト成分である<sup>11)</sup>。

一方、水晶体の調節 (accommodation) の変動が原因ではないかと調べられたこともある。フレーザー・ウィルコックス錯視を起こす図形を水晶体の調節機能を失った人に観察してもらったところ、錯視は起きたと報告された<sup>5)</sup>。筆者の予備的調査でも、60歳以上の人の半数以上は「蛇の回転」の錯視が見える。今のところ、調節説に有利な証拠は知られていない。

最適化されたフレーザー・ウィルコックス錯視には色が促進的に働く<sup>7)</sup> ので、色収差が何らかの働きをしている可能性も考えられる。色収差 (chromatic aberration) とは、眼球の光学系 (角膜、前房、水晶体、硝子体) は色消しレンズではないため、スペクトル成分が違えば屈折率が異なり、網膜像に色ずれが生じることを指す。色収差には、軸上色収差 (正面の光源あるいは物体から来た青い光は赤い光よりも屈折率が高いため、相対的に角膜に近い側で焦点を結ぶ光学的現象) と軸外色収差 (斜めから来た青い光と赤い光は網膜上の刺激位置がずれる光学的現象) が区別される<sup>13)</sup>。色収差の関与については系統的に調べられたことがないのでこれから新しい発見はあるかもしれないが、色収差は光の来る方向で決まるので、パターンの並びだけで作り出される最適化されたフレーザー・ウィルコックス錯視の説明にどの程度貢献できるかわからない。

20世紀の後半に静止画が動いて見える錯視が報告されるようになり、21世紀に入ったところで飛躍的に研究の視野が広がったが、本稿でレビューした通りフレーザー・

ウィルコックス錯視ひとつを取っても、その現象的側面ですら完全に把握できたとはいえない状況である。今後しばらくは、静止画が動いて見える錯視の現象面での整備とメカニズムの探求が並行して進められるが、いずれはこれらの錯視は運動の知覚の本質を明らかにする手がかりとなることが期待される。なお、われわれは最近、fMRIを用いた研究によって、「蛇の回転」図形はヒトのMT+野 (運動の知覚に重要な役割をもっていると考えられている大脳皮質領域) の神経活動を増加させることを明らかにした<sup>14)</sup>。

## 文 献

- 1) A. Fraser and K. J. Wilcox: "Perception of illusory movement," *Nature*, **281** (1979) 565-566.
- 2) L. Spillmann, F. Heitger and S. Schuller: Apparent displacement and phase unlocking in checkerboard patterns. Paper presented at the 9th European Conference on Visual Perception (Bad Nauheim, 1986).
- 3) A. Kitaoka and H. Ashida: "A variant of the anomalous motion illusion based upon contrast and visual latency," *Perception*, **36** (2007) 1019-1035.
- 4) J. Faubert and A. M. Herbert: "The peripheral drift illusion: A motion illusion in the visual periphery," *Perception*, **28** (1999) 617-621.
- 5) G. Naor-Raz and R. Sekuler: "Perceptual dimorphism in visual motion from stationary patterns," *Perception*, **29** (2000) 325-335.
- 6) A. Kitaoka and H. Ashida: "Phenomenal characteristics of the peripheral drift illusion," *VISION (Journal of the Vision Society of Japan)*, **15** (2003) 261-262.
- 7) A. Kitaoka: Phenomenal classification of the "optimized" Fraser-Wilcox illusion and the effect of color. Poster presentation in DemoNight, VSS2007, GWiz (Sarasota, Florida, May 14, 2007).
- 8) R. B. Conway, A. Kitaoka, A. Yazdanbakhsh, C. C. Pack and M. S. Livingstone: "Neural basis for a powerful static motion illusion," *J. Neurosci.*, **25** (2005) 5651-5656.
- 9) R. Hisakata and I. Murakami: "The effects of eccentricity and retinal illuminance on the illusory motion seen in a stationary luminance gradient," *Vision Res.*, **49** (2008) 1940-1948.
- 10) B. T. Backus and İ. Oruç: "Illusory motion from change over time in the response to contrast and luminance," *J. Vision*, **5** (2005) 1055-1069.
- 11) I. Murakami, A. Kitaoka and H. Ashida: "A positive correlation between fixation instability and the strength of illusory motion in a static display," *Vision Res.*, **46** (2006) 2421-2431.
- 12) A. L. Beer, A. H. Heckel and M. W. Greenlee: "A motion illusion reveals mechanisms of perceptual stabilization," *PLoS ONE*, **3** (7) (2008) e2741.
- 13) A. Kitaoka, I. Kuriki and H. Ashida: "The center-of-gravity model of chromostereopsis," *Ritsumeikan J. Human Sciences*, **11** (2006) 59-64.
- 14) I. Kuriki, H. Ashida, I. Murakami and A. Kitaoka: "Functional brain imaging of the Rotating Snakes illusion by fMRI," *J. Vision*, **8** (10) (2008) 16.

(2009年9月8日受理)