

# 運動錯視の定量化

佐藤 基 治\*

## はじめに

知覚された対象の性質や関係と対象の客観的性質や関係とが一致しないことを錯覚といい、それらのうちの視覚に絡んだものは錯視と呼ばれる。錯視の科学的な研究は 19 世紀後半に開始され、20 世紀初頭までに主要な錯視図形が提出されているが、1990 年代に入り、静止画像で運動の印象が得られるオオウチ錯視や最適化型フレーザー・ウィルコックス錯視が注目された（図 1）。これらの錯視の研究はまだ日も浅いために未解明の部分が多く、たとえば、視野の周辺部で観察したときに得られる運動の印象は大きいが見野の中心部では小さいという特性のメカニズムは明らかにされていないし、また運動錯視の個人差も大きな研究課題として残されている。

本論文では、これらの運動錯視に関

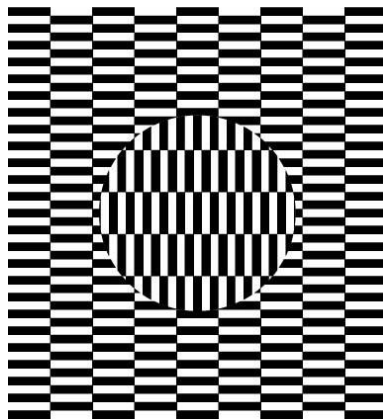


図 1 オオウチ錯視

---

\* 福岡大学人文学部准教授

するこれまでの研究を概観し、視野内の刺激提示位置が運動錯視に与える影響と運動錯視の個人差の解明のために運動錯視の定量化を試みる予備的実験を報告する。

### Fraser & Wilcox の研究

Fraser, A. & Wilcox, K. (1979) は濃淡のある影をつけた扇形の繰り返しで構成された刺激図形を使用し、視野の周辺部で観察したときの運動錯視を検討した(図2)。被験者の反応は N: 何の運動も見ないか、あるいは僅かか、一貫しないか、断続的な運動が観察される、DL: 暗から明の方向へ滑らかで連続的な運動が観察される、LD: 明から暗の方向への滑らかで連続的な運動が観察される、V: LD 方向あるいは DL 方向への滑らかで連続的な運動が観察される、の4つのカテゴリーに分類された。678人の被験者は24.9%がN、59.0%がDL、6.5%がLD、および9.6%がVの反応を報告し、合計すると被験者の約75%で錯視が生じた。また、2~3年の間隔をおいた再テストでの反応が高い再現性を持っていたことと、この反応が遺伝的な原因を示唆していることが報告されている。彼らは83組の親子の反応を調査し、強い遺伝的関係あるいは強い共通の環境要因の家族効果のいずれかがあることを示し、明瞭な親子の相関性があると述べている。さらに、遺伝・環境要因の分離を考慮するために双子を被験者とした研究を行い、反応の一致は、一卵性双子(29ペア)で0.90、二卵性双子(41ペア)で0.56、双子ではない兄弟(213ペア)で0.53であり、無関係なペアの一致は0.40であった。一卵性双子と二卵性双子の間の差は有意であり、かなり強い遺伝的要素があることを示した。しかしながら、運動錯視自体に関する議論はなされなかった。

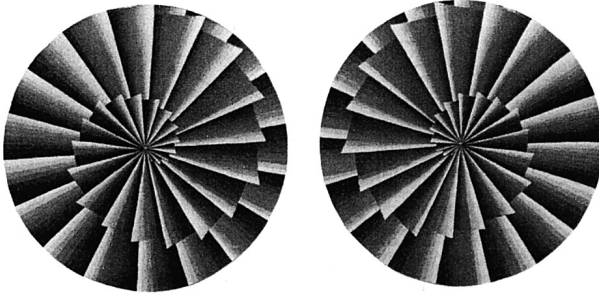


図2 Fraser, A. & Wilcox, K. (1979) の刺激図形

### Faubert and Herbert の研究

Faubert, J. and Herbert, A. (1999) は視野周辺部で観察した時、鋸歯状の輝度勾配をもつ環状に繰り返された図形が運動の感覚を引き起こすと報告した。Faubert らは、錯視図形に隣接したスクリーンに視線が向けられたとき、錯視が最大になることを見出し、錯視が眼球運動とリンクしていると考えた。

彼らの実験は、刺激画像の中心から視角  $23^\circ$  離れた4つの点のうち1つを凝視し、その後、隣接した点に滑らかに右回りに視点を移動させ、図の中に何を見たか報告させるものであった。5人の被験者は、明から暗の方向への運動の印象が観察されたことと、眼球運動の方向と運動の印象の方向は無関係であることを報告した。被験者はまた、注視点の1つを見つめ、できるだけ急速に瞬きするように指示され、すべての被験者が、注視点から別の注視点に視線を移動させるときに知覚されたものに類似した運動錯視を報告した。提示された刺激を直接見るときには錯視を報告しなかった。眼球運動や瞬きをしても、注視点を最初に見たときには、ほとんどの被験者は運動を報告しなかったが、すべての被験者がしばらくしたら運動の印象を得ることができ、さらに回転が知覚されたならば、強い運動の印象を報告した。

彼らは、厳密な実験条件ではないが200人以上の被験者にこれらの刺激画像を提示し、このうち2人だけが暗→明の方向へ運動を知覚しなかった。1人

の被験者は運動を知覚せず、また、1人の被験者は、他のすべての被験者の報告とは反対の方向の運動を観察し、残りの被験者は、暗一明の方向へ運動錯視を報告した。最初の刺激の提示に対しては、彼らのうちの多くは視野周辺部への提示を予想していなかったとはいえ、およそ半分は刺激画像中の運動の印象を報告しなかった。

200人以上の被験者の比較的統制されてはいない調査と、5人の被験者での系統的な実験の結果は、単一の点を凝視したり瞬きをしたかどうか拘らず、また、視野周辺部に刺激が提示されている間に眼球運動がなされるか否かに拘らず、暗一明の方向への視野周辺部での非常に一貫した運動錯視を明らかにした。この結果は、注視の方向の変更及び瞬きの存在に拘らず、錯視への眼球運動の強い役割を示唆しているとしている。

これらのことは少なくとも3つの条件が錯視の知覚に必要であることを示している。(1) 眼球運動、瞬きあるいは突然の刺激移動の結果として視覚システムに過渡現象が生成される「リセット」プロセスがなければならない。(2) 輝度勾配は、知覚される運動の方向を決定する。(3) 視野の周辺部では情報が比較的大きな領域で統合されるので、単に偏心的な観察でのみ知覚される錯視であることを提案している。彼らの仮説は、これらの3つのプロセスのコンビネーションが運動錯視を生成するというものであり、「周辺一時空間的一統合仮説(peripheral-spatiotemporal-integration hypothesis)」と呼ばれている。

前述したように、Fraserらは運動が知覚される方向が異なる被験者間の差異に対して、可能な遺伝的基礎について議論したが、運動錯視自体の性質は説明されないままであった。Faubertらは、彼らの錯視がFraserらの錯視と関係があることを提案した。それらの刺激では、輝度勾配は多くの場所の小さな領域内で逆転し、彼らは反応の矛盾が遺伝子型よりもむしろ表示のこれらのステップと関係があったことを提案した。

結論として、周辺ドリフト錯視は眼球運動、瞬きなどによって生みだされる

リセット、輝度の不均等性から生じる時間的順序効果と視野周辺部の時空間的統合という3つのプロセスの相互作用によって生成されると提案している。

## Kitaoka & Ashida の研究

Kitaoka & Ashida (2003) は、最適化型フレーザー・ウィルコックス錯視は視野周辺部で観察される異常運動錯視であるとしている。この錯視は、鋸歯状の輝度プロフィールによって特徴づけられるが、彼らは段階状プロフィールを備えたものがより有効であることを示し、さらに、黒色と暗灰色あるいは白色と明灰色の異なる輝度の組み合わせの順番が重要であるとした。黒色から暗灰色、白色から明灰色の方向に錯視が生じることを報告し、背景の明るさとの関係から考えると、「高コントラスト→低コントラスト」という方向へ錯視が生じると述べている。彼らは最適化型フレーザー・ウィルコックス錯視の錯視量に影響を及ぼす要因を段階的プロフィールと断片的あるいは屈曲した端とした。この研究では大きな錯視量をもつ最適化型フレーザー・ウィルコックス錯視を得る現象的規則として運動検出器モデルに基づく説明を提案している。さらに、これらの規則がオオウチ錯視などの異常運動錯視の解明に寄与することが予想されている。

その他にも、彼らは最適化型フレーザー・ウィルコックス錯視の奥行き方向への仮現運動の産出の可能性を検討したが、奥行き方向の運動錯視は生起せず、さらに、別のステレオグラムを検討した結果、奥行き方向の運動錯視、あるいは周辺ドリフト錯視から与えられる位置の変化から予期されたものと一致し、奥行き差はなかったことを報告している。

さらに、Kitaoka は異常運動錯視と運動知覚の基準系との関連性についても研究している。運動知覚の基準系は、特定の運動視覚エリアが静止しているように見える傾向に関連するものであり、オオウチ錯視のような異常運動錯視では、基準系は様々な要因で決定され、例えば、周囲が静止しているように見えている一方で内側は運動して見えるように、別の異常運動エリアを囲む異常

運動エリアは基準系となる強い傾向があること、高コントラストエリアは低コントラストエリアと比較して基準系となる傾向があること、高空間周波数エリアは低空間周波数エリアより静止しているように見えることなどが議論されている。低コントラストエリアが運動する傾向がある一方で、高コントラストエリアは静止している傾向があり、低コントラストエリアは遅延して移動するように見える。例えば図3の場合、内側が静止している一方で、周辺は移動するように見える。これは高コントラストエリアが基準系として役立つことを示唆する (Kitaoka and Ashida, 2002)。

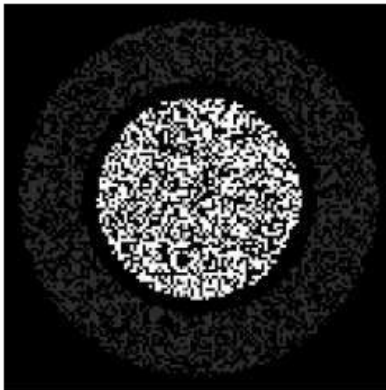


図3 低コントラストエリアと高コントラストエリア (Kitaoka and Ashida, 2002 より)

図4は低空間周波数エリアが運動の印象を与える一方で、高空間周波数エリアは静止しているように見え、この場合、内側が静止している一方で、周辺は移動するように見える。すなわち、この効果は周辺が静止しているように見える強い傾向を凌駕し、これは高空間周波数のエリアが基準系として貢献することを示唆する。視野の周辺部は、基準系の主な源として知られてきたが、異常運動錯視でもまた周辺部は基準系として働く。一方、高コントラストエ

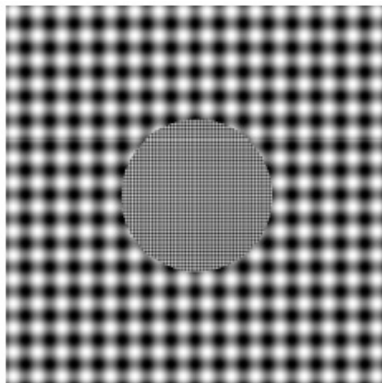


図4 低空間周波数エリアと高空間周波数エリア (Kitaoka and Ashida, 2002 より)

リアおよび高空間周波数エリアもまた基準系として利用されることが明らかにされ、これらの知見から運動錯視のメカニズムの解明がなされるのかもしれない。

### 富松・伊藤・須長の研究

最適化型フレーザー・ウィルコックス錯視に関する研究は、運動錯視の有無の判定、あるいは主観評価による錯視の強さの測定によってなされてきたが、富松ら（2005）は運動錯視の継続時間の測定による錯視量の定量化を試みた。Fraser・Wilcox と Kitaoka の実験結果を定量的に確かめるために、運動錯視の持続時間とその方向を測定し、Fraser・Wilcox の刺激を四段階の輝度に簡略化した刺激（以下 FW モデルとする）と Kitaoka・Ashida の刺激（以下 KA モデルとする）を比較した。その結果、一試行あたりに動いて見える時間の平均において、KA 刺激の方が FW 刺激よりも値が大きく、分散分析の結果、FW 刺激と KA 刺激には有意な差が認められたことによって、KA 刺激の方が FW 刺激よりも長い時間動いて見えたことが分かる。刺激画像の方向と同じ方向に動いた時間の比率において分散分析を行った結果、有意な差が認められた。よって、明らかに KA 刺激は FW 刺激よりも方向性があることが分かる。

以上のことから、KA 刺激は FW 刺激よりも錯視量が大きく、方向性も比較的安定していると述べている。

これらの先行研究を参考にし、FW モデルと KA モデルを比較することにより、最適化型フレーザー・ウィルコックス錯視が生じる要因を考察し、また、KA モデルの錯視量と運動方向の安定性を検証するための準備として、運動錯視の定量化の方法を試みる。

## 実験 1

### [目的]

富松ら（2005）の、FW モデルと KA モデルを比較した実験の追試を行い、最適化型フレーザー・ウィルコックス錯視量の定量化を試みる。

### [刺激]

刺激画像は、中心角  $5^\circ$  の扇形で構成された円を水平方向に 2 つ配置し、その上方に注視点を置いた（図 5）。それぞれの円は黒色、暗灰色、明灰色、白色の 4 段階の輝度の扇形 4 つを 1 つのユニットとして、18 のユニットで構成した。KA モデルと比較するため、本来は連続的な輝度の変化を有していた FW モデルも 4 段階の輝度にした。実験変数は刺激図形の扇形の配列（要因 1）と予想される運動錯視の方向（要因 2）であった。要因 1 は、各ユニットの扇形が黒色、暗灰色、明灰色、白色の順で配置された FW モデルを刺激図形に使

+

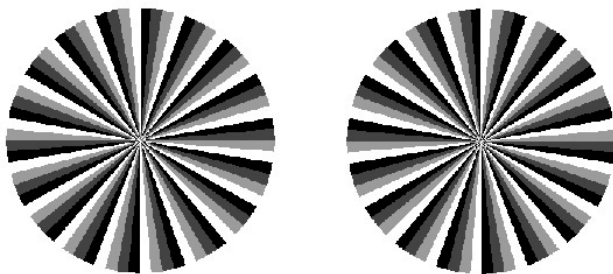


図 5 実験 1 で用いた刺激画像の例  
（上の「+」が注視点、下の 2 つの円が錯視図形）



用した FW 条件と、黒色、暗灰色、白色、明灰色の順で配置された KA モデルを使用した KA 条件の 2 水準であった。統制条件として隣接するユニットに逆の順序の配列ものを呈示し、運動錯視が生じない図形を使用した。要因 2 は、刺激図形の扇形の配列パターンを右側の円では反時計回り、左側では時計回りに運動錯視が生じるようにした内回り条件と、右側の円を時計回り、左側を反時計回りにした外回り条件の 2 水準とした。

#### [被験者]

大学生 5 人。

#### [実験装置]

パーソナルコンピューター NEC MA20V、CRT ディスプレイ MITSUBISHI RDF221H、心理学実験用ソフト Super Lab を使用した。

#### [手続き]

各試行は 0.1 秒間の音声による試行開始の合図、5 秒間の注視点のみの提示、10 秒間の刺激画像の提示、残効を消去するための 10 秒間のランダムドットの提示によって構成された。被験者は注視点を見つめたまま、刺激図形に生じた運動錯視を、運動の印象が発生したと判断したときにキーボードの「S」キーを（以下スタートボタンとする）、印象が消失したと判断したときにはスペースキーを（以下ストップボタンとする）押下することによって報告するように求められた。刺激画像は、要因 1（3 水準）×要因 2（2 水準）×繰り返し（5 回）の合計 30 試行がランダムな順序で提示された。観察距離は 60cm とした。

#### [結果と考察]

各条件でのスタートボタンからストップボタン押下までの経過時間、すなわち運動錯視の持続時間を算出した。扇形の配列パターンである FW モデルの平均は 1828ms、KA モデルの平均は 2456ms、また運動錯視の回転方向であ

る外向き条件の平均は 2559ms、内向き条件の平均は 1725ms で、配列パターン、回転方向、及び交互作用に有意な差は見られず、被験者間効果のみが有意であった。

富松ら（2005）は FW モデルよりも KA モデルのほうが運動の印象は生じやすいと報告したが、今回の実験では同様の結果は得られなかった。また、被験者による報告では（1）動き出した時点と止まった時点が判断しにくい、（2）刺激の回転が持続しないなどの指摘がなされた。これらの点から、刺激図形の提示の方法や、錯視量の測定の方法に問題があったのではないかと考えられ、さらに、刺激呈示の際、「注視点に注目するように」教示したが、注視点を凝視していると刺激図形が回転しにくいという意見があり、刺激図形と注視点との距離が大きすぎる可能性などといった刺激図形の配置の問題も考えられた。また、刺激呈示時間を最大 10 秒間で打ち切り、ストップボタンを押すと同時に刺激呈示が終了するように設定していたが、断続的に運動の印象が生じる場合の錯視量の測定も必要であるように思われる。

## 実験 2

### [目的]

実験 1 では被験者に運動の印象の判断が難しく数量化できなかったことを踏まえ、実験 2 では刺激画像の提示から運動の印象の発生までの時間を計測するとともに、最適化型フレーザー・ウィルロックス錯視の生起と関連が考えられる 3 つの要因を設定して定量化を試みた。要因 1 は刺激図形のパターン、要因 2 は回転方向、要因 3 は刺激図形を構成する扇形のサイズである。

## [刺激]

刺激画像には円形の錯視図形を6つ並べた画像を用いた（図6）。錯視図形を6つ並べたのは、どの錯視図形を注視しても、視野の周辺部に他の錯視図形が存在し、被験者が運動の印象を得やすく、したがって、より詳細な反応が可能になるであろうと考えたからである。それぞれの錯視図形は、黒色、暗灰色、明灰色、白色の4段階の輝度の扇形4つを1つのユニットとして、30、18、あるいは15のユニットで構成した。KAモデルと比較するために、FWモデルも明度を4段階に分けた。実

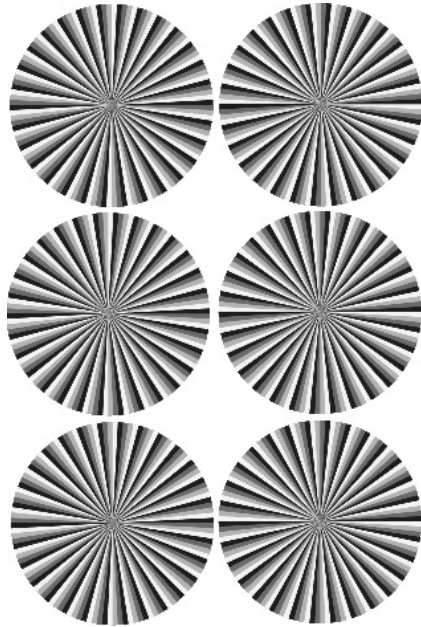


図6 実験2で用いた刺激画像の例

験の変数は刺激図形の扇形の配列（要因1）と予想される運動錯視の方向（要因2）、刺激図形を構成する扇形の中心角（要因3）であった。要因1は、実験1と同様に、FWモデルの錯視図形を使用したFW条件、KAモデルの錯視図形を使用したKA条件、および運動錯視が生じない統制条件であった。要因2は、実験1と同様に、刺激図形の扇形の配列パターンによる内回り条件と外回り条件であった。要因3は、1つの錯視図形を構成する扇形の数であり、120、72および60の3水準であった。

[被験者]

大学生 8 人。

[実験装置]

実験 1 と同様である。

[手続き]

各試行は 0.1 秒間の音声による試行開始の合図、10 秒間の刺激画像の提示、残効を消去するための 10 秒間のランダムドットの提示によって構成された。被験者は刺激画像を観察し、複数の刺激図形のいずれかに内回りの運動の印象を生じたら「N」キー、外回りの場合は「M」キーを押下することによって報告するように求められた。刺激画像は、要因 1（3 水準）×要因 2（2 水準）×要因 3（3 水準）×繰り返し（3 回）の合計 54 試行がランダムな順序で提示された。観察距離は 60cm とした。実験に先立って、練習試行を 3 回行った。

[結果と考察]

8 人の被験者のデータを記録したが、そのうち 2 人は正反応率が 50%を切っていたため、そのデータを除外して処理を行った。

FW モデルと KA モデルそれぞれの反応時間の平均値は FW 条件で 4208.8 ms、KA 条件で 3737.4ms であり、有意な差は見られなかった。錯視図形を構成する扇形の中心角条件それぞれでの平均反応時間は 3° 条件で 3997.2ms、5° 条件で 3970ms、6° 条件で 3871.3ms であり、これらも有意な差はなかった。

以前の研究によれば FW モデルよりも KA モデルのほうが運動の印象が生じやすいという報告があるために、刺激図形の扇形配列パターン間に有意な差が見られることが予測されたが、本実験では扇形の配列パターン・扇形の中心角・回転方向のそれぞれで有意な差は見られなかった。また、本実験では個人差が大きく、これは「回転したらボタンを押してください」という教示の、「回転する」という表現の曖昧さにより、反応にばらつきがあったのではないかと考えられる。

### 実験 3

#### [目的]

刺激画像の構成を改良するとともに、実験 2 の結果から最適化型フレージャー・ウィルコックス錯視の生起に関連する要因を刺激図形の扇形の配列パターンと扇形の中心角に限定して、定量化を試みた。

#### [刺激]

刺激画像には円形の錯視図形を 9 つ並べた画像を用いた（図 7）。錯視図形を 9 つ並べたのは、実験 2 の刺激画像よりもさらに運動の印象を得やすく、したがって、より詳細な反応が可能になるであろうと考えたからである。それぞれの錯視図形は、黒色、暗灰色、明灰色、白色の 4 段階の輝度の扇形 4 つを 1 つのユニットとして、18、あるいは 15

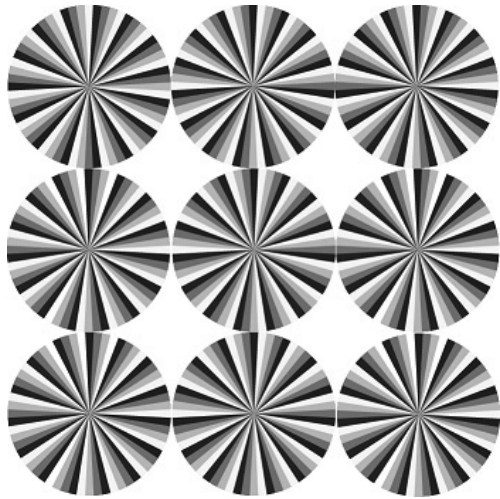


図 7 実験 3 で用いた刺激画像の例

のユニットで構成した。KA モデルと比較するために、FW モデルも明度を 4 段階に分けた。実験の変数は刺激図形の扇形の配列（要因 1）と刺激図形を構成する扇形の中心角（要因 2）であった。要因 1 は、実験 1 と同様に、FW モデルの錯視図形を使用した FW 条件、KA モデルの錯視図形を使用した KA 条件、および運動錯視が生じない統制条件であった。要因 2 は、1 つの錯視図形を構成する扇形の数であり、72

および 60 の 2 水準であった。

[被験者]

大学生 11 人。

[実験装置]

実験 1 と同様である。

[手続き]

各試行は 0.1 秒間の音声による試行開始の合図、10 秒間の刺激画像の提示、残効を消去するための 10 秒間のランダムドットの提示によって構成された。被験者は刺激画像を観察し、複数の刺激図形のいずれかに運動の印象を生じたらスペースキーを押下することによって報告するように求められた。刺激画像は、要因 1 (3 水準) × 要因 2 (2 水準) × 繰り返し (6 回) の合計 36 試行がランダムな順序で提示された。観察距離は 60cm とした。実験に先立って、練習試行を 6 回行った。

[結果と考察]

11 人の被験者のデータを記録したが、そのうち 1 人は正反応率が 50% を切っていたため、そのデータを除外して処理を行った。

FW モデル KA モデルそれぞれの反応時間の平均値は FW 条件で 2363.6ms、KA 条件で 1787.74ms であり、有意な差は見られなかった。錯視図形を構成する扇形の中心角条件それぞれでの平均反応時間は 5° 条件で 1867.8ms、6° 条件で 2283.4ms であり、これらも有意な差はなかった。また、実験 2 と同様、被験者間効果が有意 ( $P=0.02$ ) であった。

実験後におこなった被験者へのアンケートを検討すると運動錯視の観察経験の有無が反応時間に影響しているように見受けられたので、10 名の被験者を運動錯視観察の経験者と未経験者に二分し分析した。実験室での運動錯視図形

の観察の未経験被験者群では、図形・角度・図形×角度に有意な差は見られなかったが、錯視図形の観察経験がある被験者群では、錯視図形を構成する扇形の中心角に有意な差（ $P=0.032$ ）が見られた。

## まとめ

フレーザー・ウィルコックス錯視図形を四段階の輝度に簡略化した錯視図形（FWモデル）と Kitaoka・Ashida の錯視図形（KAモデル）の錯視量を比較するための測度作成を目的として、運動錯視の立ち上がり時間や継続時間を測度とした刺激図形の配置が異なる3つの実験を行った。いずれの実験においてもKAモデルとFWモデルの間で有意な差は見られなかった。このことから、KAモデルとFWモデルの錯視量に一般に言われているほどには差がない可能性と、あるいは運動錯視の立ち上がり時間や継続時間を測度として用いることは意味が無い可能性が考えられる。今後さらに、検討が必要であろう。

運動錯視の立ち上がり時間には被験者間の差が大きく、質問紙により被験者の運動錯視図形の観察経験を検討すると、観察経験の豊富な被験者とそうではない被験者とでは差がみられるように思われ、今後さらに観察経験を統制した詳細な実験的研究が必要であると考えられる。

運動錯視の錯視量が立ち上がり時間や継続時間を測度として定量化できないとしたら、運動そのものを測度として定量化することが考えられる。例えば、実際に一定の速度の回転運動を錯視図形に与え、運動錯視による運動の印象を相殺することによって運動錯視の定量化を検討している。

本研究では視野の周辺部で生じる運動錯視を観測するために2、6、あるいは9個の錯視図形を配置した刺激画像を使用した。運動錯視が生じやすくなった一方で、運動錯視が生じにくい刺激図形でも数を増やすことにより運動の印象が得られた。刺激画像での錯視図形の配置などをさらに検討する必要がある。

るように思われる。

実験3において、運動錯視の観察経験の多い被験者は刺激図形を構成する扇形の中心角に有意な差がみられ、中心角 $5^\circ$ の扇形により構成された錯視図形のほうがより錯視量が大きかった。観察経験と錯視図形のパターンの交互作用による錯視量への影響を検討することも考えられる。

## 参考文献

- Faubert, J. and Herbert, A. (1999), The peripheral drift illusion: A motion illusion in the visual periphery, *Perception*, vol.28, pp617-621
- Fraser, A. & Wilcox, K. (1979), Perception of illusory movement, *Nature*, vol.281, pp565-566
- 柏野牧夫・西田真也 (2001), 錯覚の情報学—騒音のなかでつながる途切れた音, *日経サイエンス*, vol.2. pp124-125
- 北岡明佳 (2001), 錯視のデザイン学, *日経サイエンス*, vol.31 (2), pp134-135
- Kitaoka, A. & Ashida, H. (2003), Phenomenal Characteristics of Peripheral Drift Illusion, *VISION*, vol.15, pp261-262.
- 北岡明佳 (2006), 止まっているものが止まって見える理由—“心の矛盾” 錯覚から脳を読む, *Bionics*, vol. 3 (1), pp55-59
- 日本視覚学会 (2000), 視覚情報処理ハンドブック
- Ouchi, H. (1977) Japanese optical and geometrical art. Mineola NY: Dover.
- 富松・伊藤・須長 (2005), 周辺ドリフト錯視の定量的測定, *電子情報通信学会技術研究報告*, vol.105 (165), pp31-33