

令和6（2024）年度  
理学部 卒業論文

フレージャー・ウィルコックス錯視族の  
回転運動発生条件に関する研究

分野名 物質科学  
学籍番号 212049  
氏名 小泉陽菜乃  
指導教員 ミケレット・ルツェロ

令和7年1月31日 提出

フレーザー・ウィルコックス回転錯視族の

回転運動発生条件に関する研究

A study of the conditions for the generation of rotational motion  
in the Fraser-Wilcox rotation illusion family

分野名 物質科学  
学籍番号 212049  
氏名 小泉 陽菜乃  
指導教員 ミケレット・ルツェロ

The findings obtained through the study of optical illusions can be applied to various fields and are useful for solving real-world problems. It is hoped that the elucidation of the mechanism of this illusion (Figure 1) will lead to an understanding of the mechanisms of the connections between the visual cortex and the brain. In this study, we aimed to elucidate the conditions for the generation of the rotation illusion caused by differences in color, and we conducted quantitative measurements and analysis of perceptual strength, as well as considering the relationship with biological mechanisms. In this study, we conducted two experiments created in Python on seven subjects and obtained the following results.

錯視研究によって得られる知見は様々な分野に応用でき、実社会の課題解決に役立つ。特に本錯視画像（図1）のメカニズム解明は、視覚野や脳とのつながりの仕組みを解明することにつながることを期待される。そこで本研究では、色の違いによる回転錯視の錯視発生条件解明を目的に、知覚強度の定量的な測定と分析、および生物学的な機構との関連の考察を行った。本研究では7名の被験者に Python で作成した2種類の実験を実施し、以下の結果を得た。

- 「蛇の回転」錯視の画像をグレースケール化し、RGBすべてを0から255まで変化させ、その画像を4枚ごとに提示させた。錯視の発生条件を測定し結果を解析した。被験者ごとに錯視の発生境界があることがわかり、ある範囲で発生境界がある子が定量的に示された。
- 錯視の発生条件はコントラストを徐々に上げて提示した時と下げて提示した時とで差がないことが分かった。
- 蛇の回転錯視をグレースケール化した画像のRGBをR、G、B、RG、RB、GBそれぞれ

れを下げていき、その画像系 256 枚を提示し錯視の強度を測定した。R と G を徐々に下げたときに、グラフにシグモイド関数のような傾向が見られたため、錯視の発生境界が明確に存在する可能性が示唆される。また R と B を下げたグラフには錯視が増加する現象が見られた。

- グレースケール化した画像においては網膜照度と、色に関する実験から得られた結果から錯視の強度変化には桿体細胞が強く関わっていることを考察した。

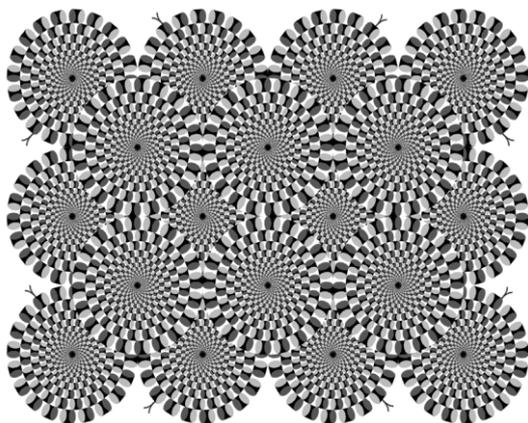


図 1 「蛇の回転錯視」をグレースケール化したもの。本研究で使用した画像。

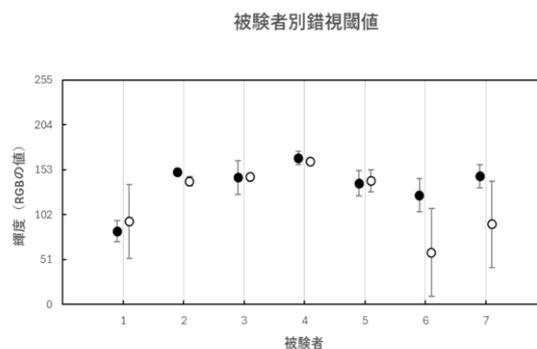


図 2 図 1 の画像の RGB 成分を 255 から 0 まで下げた場合と、0 から 255 まで上げた場合の被験者別錯視閾値。横軸は被験者、縦軸は輝度を表す。

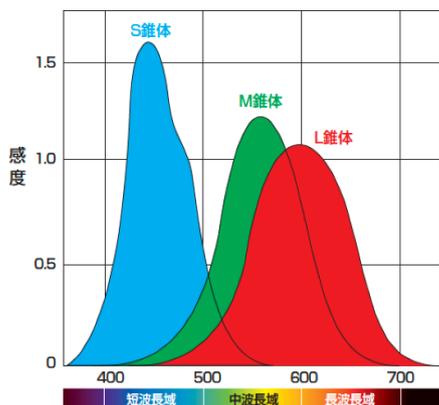


図 3 『新編色彩科学ハンドブック』第 2 版 日本史記載学会編(財)東京大学出版会(1998 年)より改変。錐体細胞の感度曲線。横軸は波長、縦軸は感度を表す。

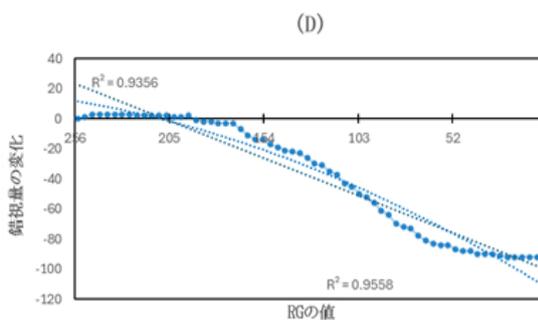


図 4 図 1 の画像の R と G の成分のみ変化させた際の錯視強度の変化。横軸は RGB の値、縦軸は錯視強度を示す。

# 内容

1 章 序論	5
1.1 背景.....	5
1.2 研究目的.....	5
2.1 錯視の定義 .....	6
2.2 「蛇の回転」について .....	7
2.3 フレーザー・ウィルコックス錯視について.....	9
2.4 錐体細胞と桿体細胞について .....	13
3 章 実験概要.....	14
3.1 グレースケール画像の実験概要 .....	14
3.1.1 実験環境と被験者について .....	14
3.1.3 実験方法 .....	16
3.2 各 RGB 画像の実験概要 .....	18
3.2.1 実験環境と被験者について .....	18
3.2.2 実験方法 .....	18
4 章 錯視効果の結果と解析 .....	20
4.1 グレースケール化による錯視閾値の結果.....	20
4.1.1 画像提示順別の結果 .....	20
4.1.2 コントラストの変化と錯視効果の関係性.....	22
4.2 RGB の変化による錯視閾値の変化の分析.....	23
4.2.1 色ごとの錯視強度の変化.....	23
4.2.2 被験者別錯視強度の変化.....	28
4.3 考察.....	29
5 章 結論.....	30

6章	コード.....	31
7章	参考文献.....	36
8章	謝辞.....	37

# 1 章 序論

## 1.1 背景

錯視研究は 19 世紀中期に始まると考えられるが、19 世紀後半の心理学の成立以来、心理学の歴史の中において一定の地位を占めてきた(後藤・田中, 2005; Robinson, 1972; Wade, 2005)。近年の IT 技術の発達によって、それまでは線画が中心であった錯視図形は、色やグラデーションを含む複雑な画像の作成も可能となり、さらに発展を広げている(北岡, 2001; 北岡・蘆田, 2012)。その一方で、我々のほとんどが錯視の構造、仕組み、錯視発生のメカニズム、我々の日常にもたらされる錯視研究の恩恵などを理解していない。しかし知覚心理学や脳神経科学の発達に伴って錯視に科学の光が当たったことで、大きく進展しつつある。

さらに、人は外界からの刺激の多くを視覚から得ている。つまり、人の視覚が引き起こす錯視のメカニズムの全容解明は、ヒトの脳を理解する上でもとても重要である。このように、錯視研究はヒトの脳研究とも密接に関係しており、錯視研究の進捗は脳研究を進展させ得る。このように、脳を研究するという観点からも錯視研究は有意義である。また、錯視研究によって得られた知見を、脳研究以外にも、我々の日常生活において有効活用できることが報告されている。実際に、錯視研究によって得られた知見は、医療や福祉、建築、交通、環境デザインをはじめ、脳神経の気候に関連した工学分野にも応用でき、実社会の課題解決に役立つ。

## 1.2 研究目的

本研究で扱う回転する錯視は、フレーザー・ウィルコックス錯視、特に立命館大学北岡明佳が作成した「蛇の回転」の錯視画像を用いて行う研究である。本研究の目的は、色変化による錯視発生の条件変化の解明である。その為に、錯視画像による知覚強度の定量的な測定と、その分析を行う。知覚強度の定量的な測定は、実際に被験者を募りデータを収集、解析する。この錯視画像を段階的に色変化させ、定量的に変化・測定・解析した既往研究はなく、新規性があると言える。前述の通り錯視研究で得られた知見は、脳研究をはじめ、様々な分野に応用することで、実社会の問題解決に役立つ。本研究でも錯視を通しての色やコントラストの役割の理解を最終目的とする。

## 2 章 関連研究

### 2.1 錯視の定義

本研究では錯視図形を用いた知覚実験を行った。そこでまず錯視の定義を確認する。

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も長く見える(図 1(A))。では次に立方体の投影を眺めてみよう(図 1(B))。それはボリューム感をもった立体に見える。しかし物理的には線分からなる閉図形の集まりにすぎない。また、TV 映像を観察してみると、ディスプレイ平面に流れるさまざまな輝度の二次元の光パターンではなく、後代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。このように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ばないために、立場を変え、錯視とは、ある物理的な三次元外界構造の投影増が入力された時、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する。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の定義から外れることになる。例えば、盲点における充填を考えてみよう(図(C))。盲点協会を覆うような青色のドーナツがああ図形を呈示すると、盲点内部が青一色で埋め尽くされる。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、それを克服しようとした結果が充填知覚なのである。

上述の議論は方向性が間違っており、錯視とは、入力 of 二次元画像から逸脱した知覚が生じることでもなく、外界の三次元世界から逸脱した知覚を生じることでもない。錯視とは、ある資格情報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。

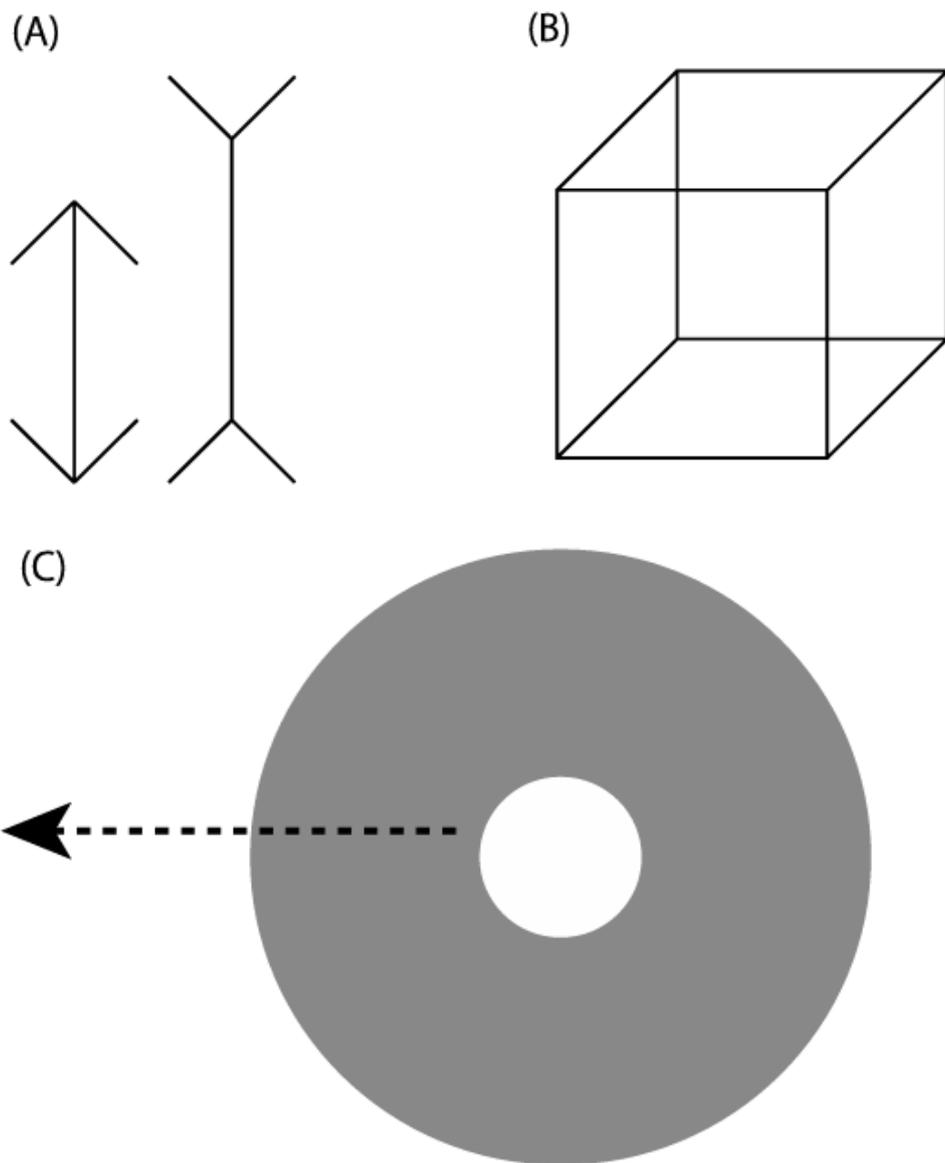


図 1(A)ミュラー・リヤー錯視。垂直線分は右のものが左のものより長く見えるが、同じ長さである。図 1(B)ネッカーの立方体(Necker cube)。立方体を並行投影した二次元図形を見ると、立体感が感じられるが、単に線分が集まってできた形にすぎない。図 1(C)盲点における知覚的充填。右目だけが開き、破線矢印の向きに徐々に視線を移動していくと、ある場所で右側の黒い中抜き円が充実円のように見える。

## 2.2 「蛇の回転」について

本研究で用いた錯視は立命館大学の北岡明佳先生が 2003 年 9 月に作成した錯視画像である。北岡先生は 2003 年 1 月に「卵図巻き」という回転錯視を作成したが、「黒→濃い灰色→白→薄い灰色→黒」の方向に動いて見えるという錯視の原理を用いて、さらに錯視量の強い「蛇の回転」を創作した。

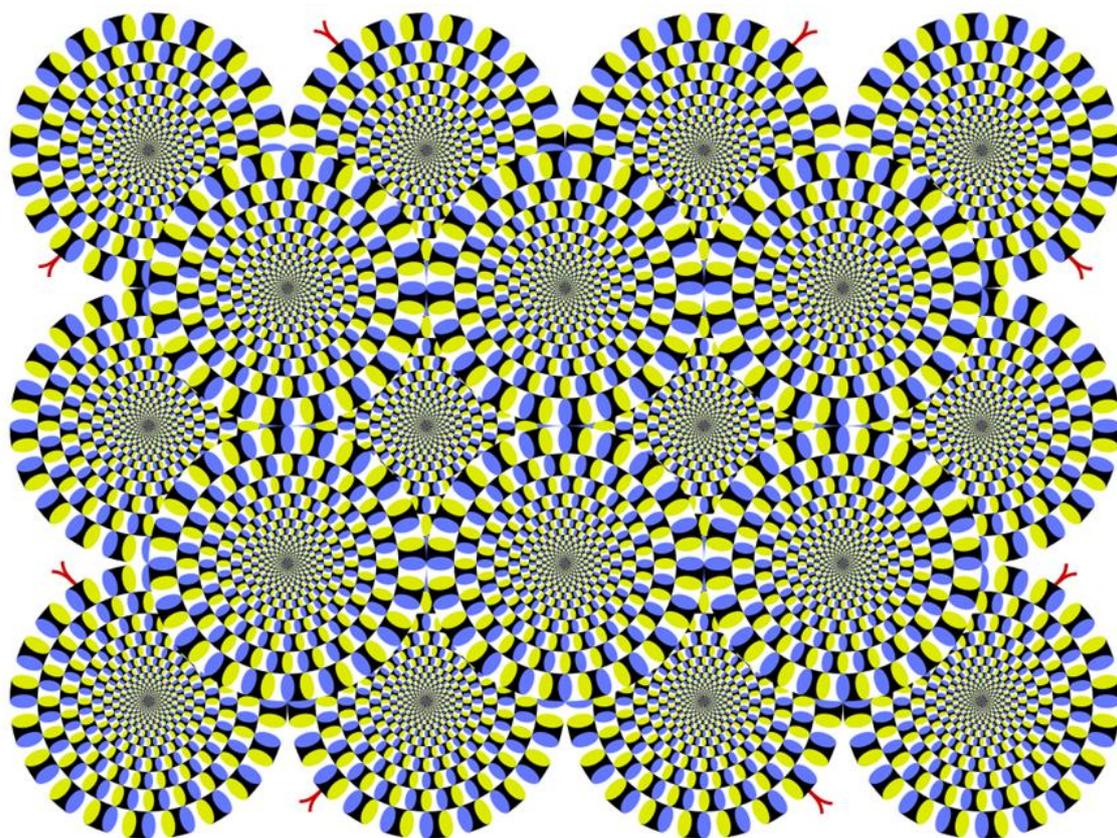


図2 「蛇の回転」。蛇の円盤が勝手に回転して見える。

## 2.3 フレーザー・ウィルコックス錯視について

1.2 節でも述べた通り、本研究では立命館大学北岡明佳によって「蛇の回転」の錯視画像が作成された(図 2)。これは、「最適型フレーザー・ウィルコックス錯視」という基本錯視により回転して見える。なお、ここでいう「最適化フレーザー・ウィルコックス錯視」「フレーザー・ウィルコックス錯視」「周辺ドリフト錯視」という 3 つの言葉の定義を確認する。

Fraser and Wilcox(1979)は、暗い色から明るい色へのグラデーションをらせん状に繰り返し配置した図(図 3-1)がゆっくりと回転して知覚されることを発表した。これがフレーザー・ウィルコックス錯視のオリジナルである。その数年後、Kitaoka and Ashida(2003)は錯視量を強めた輝度勾配パターン(図 3-2)を発表した。Kitaoka は後にこのパターンを「最適型フレーザー・ウィルコックス錯視(optimized Fraser-Wilcox illusion)」と呼んでいる。ここで留意すべき名称として、「周辺ドリフト錯視(peripheral drift illusion)」がある。周辺ドリフト錯視は、フレーザー・ウィルコックス錯視と同一視される場合と、別の錯視とみなされる場合がある。元々の周辺ドリフト錯視は、Fraser and Wilcox(1979)の約 20 年後、Faubert and Herbert(1999)によって発表された錯視の一つである。それは、フレーザー・ウィルコックス錯視と同じく回転運動が知覚されるというものであった。周辺ドリフト錯視の光学的な特徴がフレーザー・ウィルコックス錯視とほとんど同じであり、周辺視で動いて見えるという特徴はフレーザー・ウィルコックス錯視にも当てはまるため(Fraser & Wilcox, 1979; Hisakata フレーザー・ウィルコックス錯視の研究動向 219 & Murakami, 2008; Naor-Raz & Sekuler, 2000)、両者を指して周辺ドリフト錯視と呼ぶ例や(e.g., Backus & Oruç, 2005; Billino, Hamburger, & Gegenfurtner, 2009)、区別が一貫しない例(Fermuller, Ji, & Kitaoka, 2010) などがある。さらに、Kitaoka and Ashida (2003) も、最適化型フレーザー・ウィルコックス錯視を発表した当初は、周辺ドリフト錯視と呼んでいたため、北岡による最適化型のパターンを周辺ドリフト錯視と呼ぶ例もある(Beer, Heckel, & Greenlee, 2008, Fermuller, Ji, & Kitaoka, 2010)。

その一方で北岡は、2003 年時点では自身の「最適化型」も含めて周辺ドリフト錯視と総称していたが、2005 年以降はフレーザー・ウィルコックス錯視(族)と称するようになっていく(北岡, 2005)。その理由として彼は、「周辺ドリフト錯視とは、まばたきする時に瞬間的に起こる錯視的運動のことであって、ゆっくり動いて見える錯視とは別物」だからと述べている(北岡, 2005)。つまり、図形としての光学的な構造は本質的に同じで

あるが、知覚される運動の様相が異なっているため分けるべきだという意見である。  
(2015, 松下, 戦具)

これらを踏まえたうえで、今回の「蛇の回転」に関する北岡氏のホームページの文献からは「周辺ドリフト錯視」という錯視として説明しているが、2005年以前の文書のため、現時点ではフレーザー・ウィルコックス錯視と言い換えてよいと解釈する。

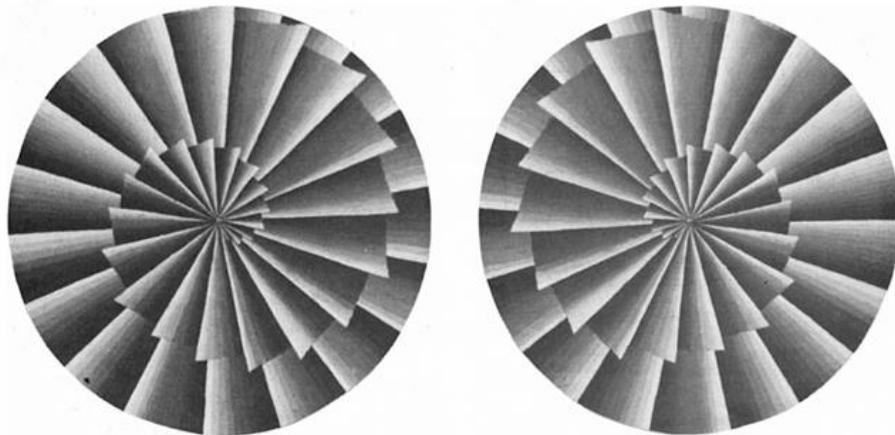


図 3-1 オリジナルのフレーザー・ウィルコックス錯視。輝度に勾配がついており、グラデーション上の暗い部分から明るい部分の方向へゆっくりとした回転運動が知覚される。A. Fraser, and K. J. Wilcox, 1979, Nature, 281

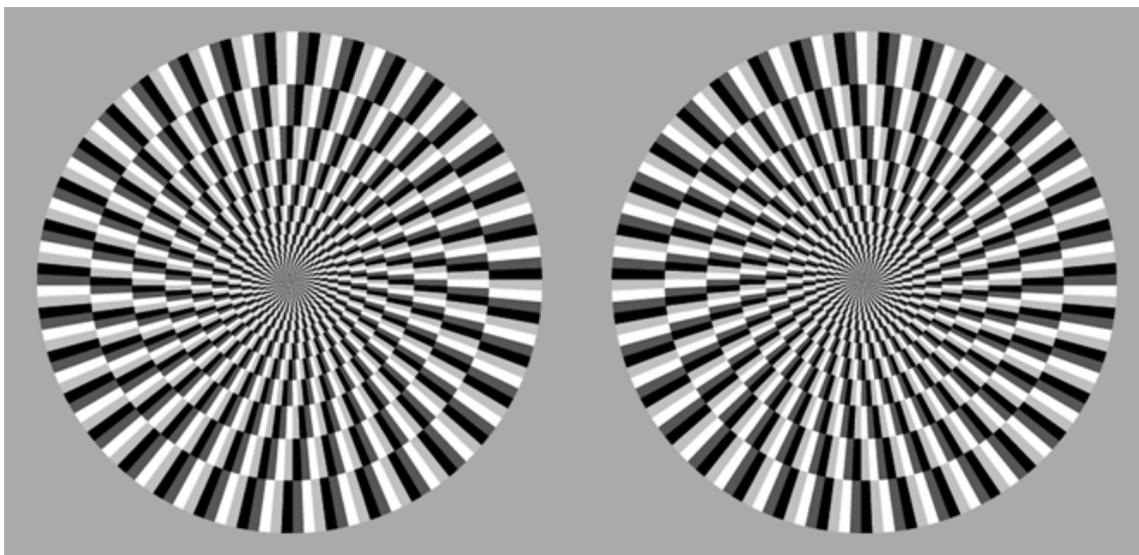


図 3-2 最適型フレーザー・ウィルコックス錯視族（フレーザー・ウィルコックス錯視族）。最高輝度（白）と最低輝度（黒）とが隣り合っていない。

その上で「蛇の回転」の原理であるフレーザー・ウィルコックス錯視について確認する。以下がその説明である。

周辺ドリフト錯視とは、周辺視で観察される異常な運動錯視を指す（図 3-3）。この錯視は、鋸歯状の輝度プロファイルを持つ縞模様によって特徴づけられてきたが、段階的なプロファイルを持つ縞模様の方がより効果的であることがわかった。さらに、異なる輝度の4つの領域の順序が重要である。すなわち、黒と濃い灰色の組み合わせ、または白と薄い灰色の組み合わせである。具体的には、黒領域から隣接する暗灰色領域に向かう方向、または白領域から隣接する明灰色領域に向かう方向に、錯視的な動きが現れやすい（図 3-4）。この順序は、図 3-5 に示されているようにフレーザー・ウィルコックス錯視を増強する。錯視の強さに影響を与える2つの新しい要因を指摘する。(1) フレーザー・ウィルコックス錯視は、前述の通り段階的な輝度プロファイルによって増強される。図 3-3 のような滑らかな輝度プロファイルを持つ刺激は、より弱い錯視を与える。(2) フレーザー・ウィルコックス錯視は、断片化や曲がったエッジによって増強される。長いエッジで構成された刺激は、より弱い錯視を与える。

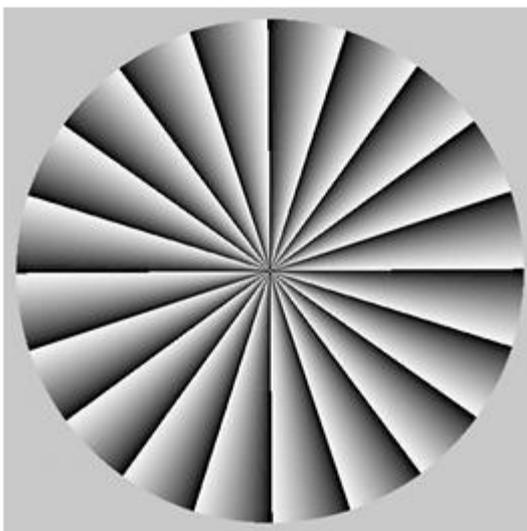


図 3-3 周辺ドリフト錯視。観察者がこの図を周辺視で見た場合、円がゆっくり回転して見える。Fraser と Wilcox<sup>1)</sup> は、錯視の回転方向が個人によって時計回りまたは反時計回りであると報告したが、最近の研究<sup>2, 3)</sup> では、この場合の回転は時計回りだけであると述べている。



図 3-4 周辺ドリフト錯視（フレージャー・ウィルコックス錯視の規則、すなわち、黒から暗灰色へ、白から明灰色へ。矢印は、黒または白の領域から生じる想定される局所的な運動信号とその強さを示す。

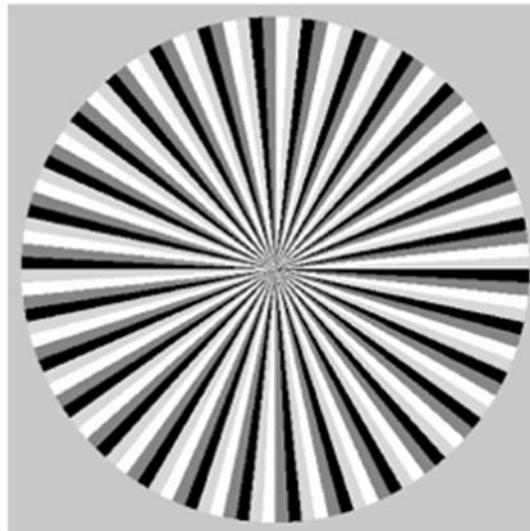


図 3-5 新しいルールによる周辺ドリフト錯視の強化。観察者がこの図を周辺視で見た場合、円が時計回りに回転して見える。この錯視的な回転は、図 3-3 よりも強い。

## 2.4 錐体細胞と桿体細胞について

色や輝度に関する研究をするうえで視細胞について言及しておきたい。

視細胞は4つの機能的な部位を共通にもつ。外節、内節、細胞体、シナプス細胞である。ほとんどの脊椎動物は、桿体(rod)と錐体(cone)という2種類の視細胞をもっている。桿体と錐体で最も重要な機能的な違いは、光に関する感度の違いである。錐体はたった一つの光子を吸収することにより神経的な信号を発することができ、暗い光環境の下で資格をつかさどっている。しかし、夜明けが近づき光の強度が上がってくるにつれ、光強度の変化に応じて応答しなくなる。錐体は、桿体と比べると光に対する感度がずっと低い。錐体の応答は桿体と比べるとかなり速い。錐体については応答する光の波長が異なる3種類存在する。すなわち、L錐体、M錐体、S錐体である。

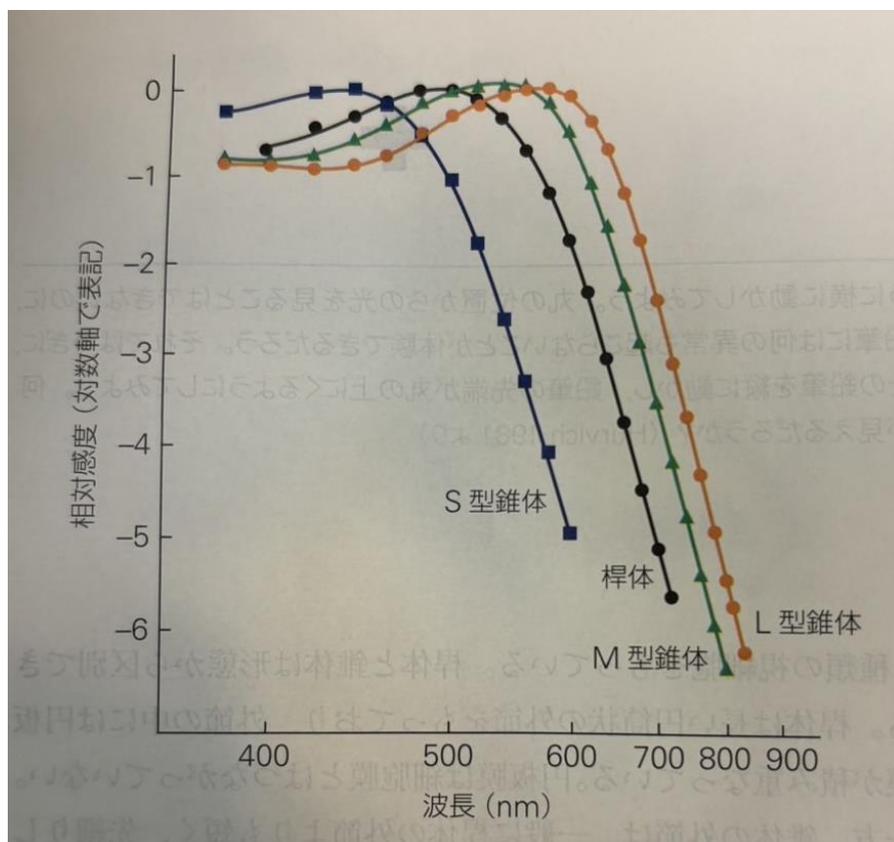


図4 3種類の錐体と桿体のスペクトル感度。

『カンデル神経科学第2版』2002年発行より

## 3 章 実験概要

### 3.1 グレースケール画像の実験概要

#### 3.1.1 実験環境と被験者について

被験者は、成人男女7名で全員晴眼者（眼鏡、コンタクトレンズ等の矯正も含む）である。実験を行った期間は、2024年10月2日から10月17日までの約二週間で、全て横浜市立大学にある理学系研究棟の一室で行った。さらに、被験者が静かな状態で実験に集中できるように、必要以上に話しかけないようにした。

#### 3.1.2 実験機器と「蛇の回転」錯視について

本研究で用いたPC(LIFEBOOK UH08/E3)のディスプレイサイズは、幅307×奥行197×高さ15.5mmである。図は本研究で用いた錯視画像の一部である。この画像は、節で紹介した「蛇の回転」錯視の画像をグレースケール化したものである。本錯視画像による知覚強度の定量的な測定は、未だ行われておらず、本錯視の錯視発生条件も解明されていない。実験では、PC全体に画像を表示した。

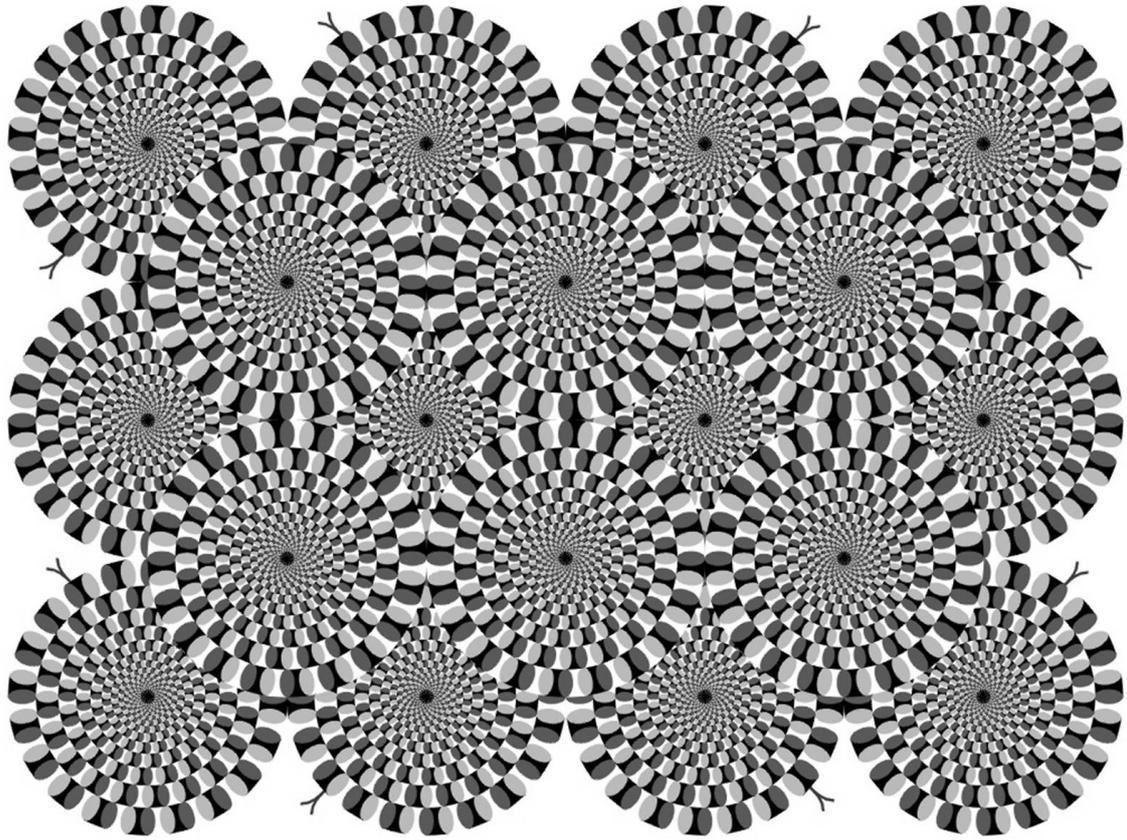


図5 図「蛇の回転」をグレースケール化したもの。

### 3.1.3 実験方法

実験は、PC 上の Python で作成した実験装置を用いて行った。まず、被験者にデスク上に置かれた、実験用 PC ディスプレイに正対するように椅子に座ってもらった。被験者は映像が映し出されたスクリーンを見た。一定の間隔で画像のグレーレベルが変化し、被験者は錯視が薄れる(または現れる)ときにボタンを押すように指示された。つまり、錯視を知覚する閾値を画像のグレーレベルの関数として測定した。被験者が実験中に行う操作は、画面上にある二つのボタンをクリックするのみであり、操作自体はシンプルである。被験者は、画像の回転がなくなる画像と、回転が始まる画像でボタンを押した。この操作を 5 回ずつ繰り返した。

実験手順 1 (RGB(255, 255, 255)の画像から(0, 0, 0)の画像へ変化する場合)

- ① パソコンの前に座る。
- ② 被験者の名前を入力する。
- ③ グレースケール画像の輝度が最も明るい画像を表示される
- ④ 被験者は「回転している」ように見えたらキーボードの右端下にある「右矢印キー」を押し、次の RGB 画像へ切り替える。この際 RGB の段階は 4 段階ごとに下がる。例えば RGB(255, 255, 255)の画像の次は RGB(251, 251, 251)の画像が表示される。
- ⑤ 被験者は錯視を感じなくなった画像、すなわち回転しなくなった画像で Space キーを押す。
- ⑥ 更に右矢印キーを押し、RGB(0, 0, 0)の画像まで表示させる。
- ⑦ ①～⑥の試行を合計で 5 回繰り返す。

実験手順 2 (RGB(0, 0, 0)の画像から(255, 255, 255)の画像へ変化する場合)

- ① ②は実験手順 1 と同様である。
- ③ グレースケール画像の輝度が最も暗い画像が表示される。
- ④ 被験者は「回転している」ように見えたらキーボードの右端下にある「左矢印キー」を押し、次の RGB 画像へ切り替える。この際 RGB の段階は 4 段階ごとに上がる。例えば RGB(0, 0, 0)の画像の次は RGB(4, 4, 4)の画像が表示される。
- ⑤ 被験者は回転し始めた画像で Space キーを押し、さらに左キーを押し RGB (255, 255, 255)まで表示させ、この試行を 5 回繰り返す。

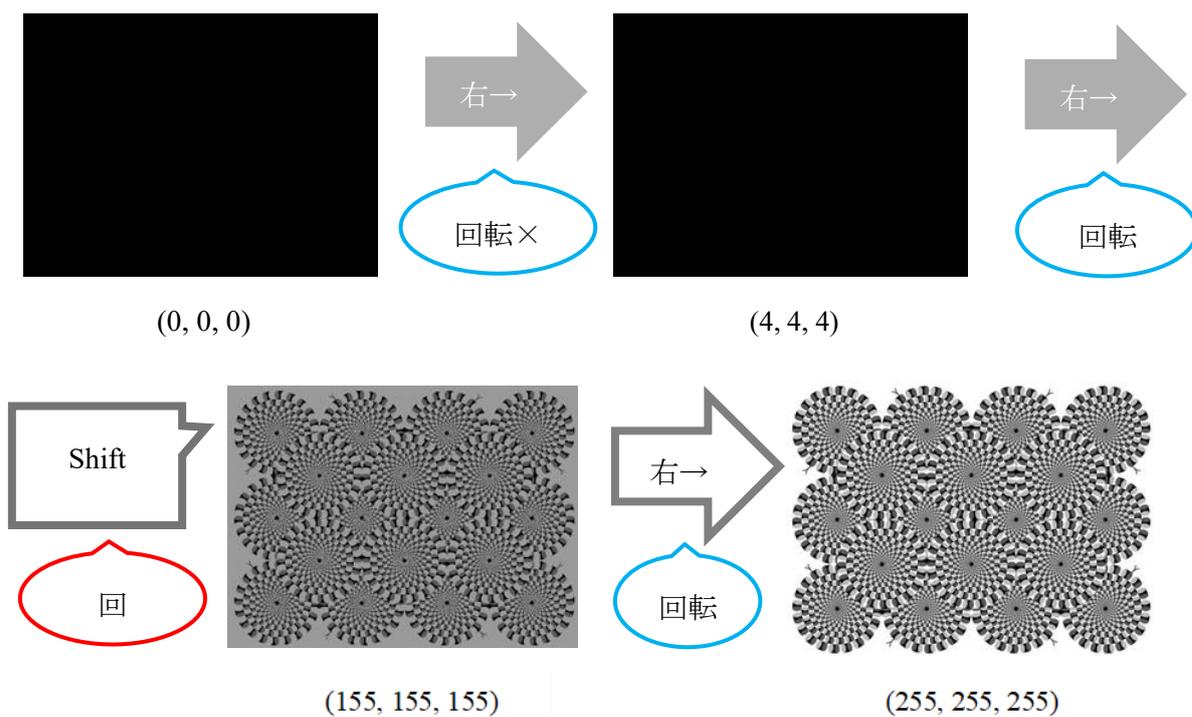


図 6-1 実験手順 2 (RGB(0, 0, 0)の画像から(255, 255, 255)の画像へ変化する場合)

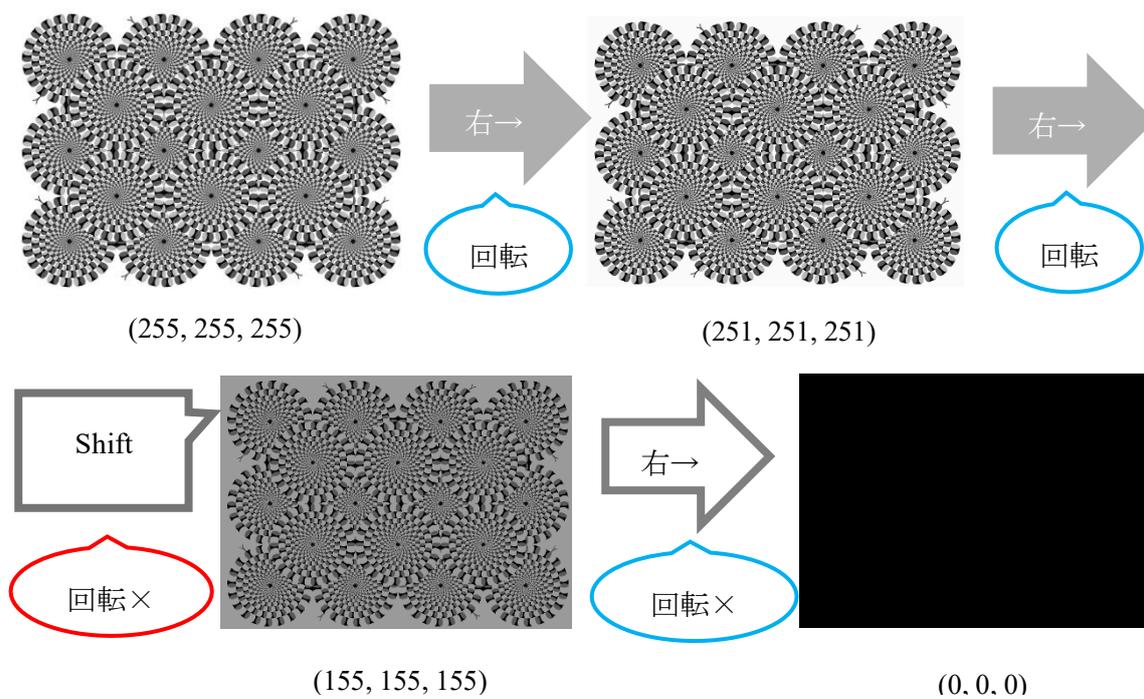


図 6-2 事件手順 1 (RGB(255,255,255)の画像から(0,0,0)の画像へ変化する場合) の説明。

## 3.2 各 RGB 画像の実験概要

### 3.2.1 実験環境と被験者について

被験者は、成人男女 5 名で全員晴眼者（眼鏡、コンタクトレンズ等の矯正も含む）である。実験を行った期間は、2025 年 1 月 16 日で、全て横浜市立大学にある理学系研究棟の一室で行った。さらに、被験者が静かな状態で実験に集中できるように、必要以上に話しかけないようにした。

### 3.2.2 実験方法

実験は、PC 上の Python で作成した実験装置を用いて行った。まず、被験者にデスク上に置かれた、実験用 PC ディスプレイに正対するように椅子に座ってもらった。被験者が実験中に行う操作は、画面上にある三つのボタンをクリックするのみであり、操作自体はシンプルである。被験者は、最初に提示された画像と次に提示された画像を比較し、錯視がより強まっているか、弱まっているか、変わらないかを判断する試行を 5 回繰り返した。よく知られているように、錯視の各色は 3 つの基本色で構成されている。RGB はそのレッド(Red)、グリーン(Green)、ブルー(Blue)の頭文字をとったもので、この 3 色は「光の三原色」と呼ばれている。上記 3 色を組み合わせてすべての色を表現している。この実験では、これらのレベルのうち 1 つもしくは 2 つのみを変化させ、残りは固定しておく。例えば、「R」と呼ばれる実験では、画像の各色について、赤の「R」レベルを徐々に変化させ、他の 2 つの値「G」と「B」は一定に保つ。被験者に、錯視量が強くなるのを見たらボタンを押してもらい、錯視が目立たなくなるのを見たら（言い換えれば、蛇の回転が強くなったり弱くなったりしたら）もう 1 つのボタンを押してもらおう。「RG」、「RB」、「GB」と呼ぶ実験では、同様の手順を行うが、これらの実験では、パラメータのうち 2 つを変化させ、1 つだけを一定に保つ。つまり、「RG」と呼ぶ実験では、画像の各色について、赤「R」と緑「G」の値を徐々に変化させ、青「B」のレベルは変化させない。先ほどと同じように、被験者に、錯視が強くなったら 1 つのボタンを押してもらい、弱くなったらもう 1 つのボタンを押してもらおう。またこの実験に関しては画面の中央に視線を定めて実験をしてもらうように指示した。

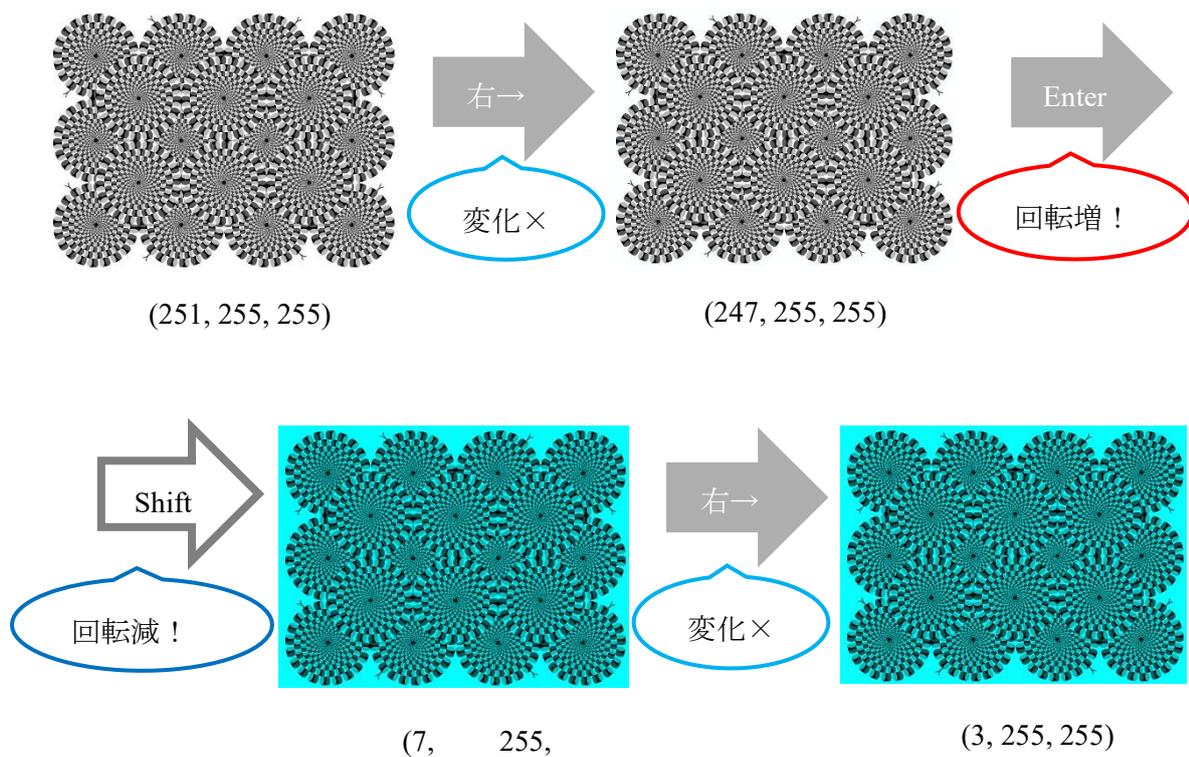


図7 実験概要を説明した。図はRGBの「R」の要素のみを4段階ごとに变化させた場合の表示される画像である。被験者は、前の画像と比較して回転の量が変化しないとした場合は「右→」キーを、錯視量が増加したとした場合は「Enter」キーを、錯視量が減少したとした場合は「Shift」キーを押す。

なお今回の実験では元々RGBの変化が4段階ごとの画像を提示し、その試行を5回繰り返す予定であった。しかし、表示させる最初の画像がRGB(255, 255, 255)ではなく、(251, 255, 255)であったため、一段階ずつずれてしまい、4回目の試行の時点ですべての画像を表示させることになった。

## 4 章 錯視効果の結果と解析

### 4.1 グレースケール化による錯視閾値の結果

4.1.1 節、4.1.2 節では、「蛇の回転」画像をグレースケール化した場合の錯視効果を測定した。4.1.1 節で、画像のコントラストを下げた時と上げた時の閾値を示し、4.1.2 節では、2つの閾値を比較した結果を示した。

#### 4.1.1 画像提示順別の結果

以下に2パターンの画像提示順序別での実験結果を示した。図は画像が、RGB(0,0,0)の錯視が見えない画像から徐々にRGBの値が大きくなっていく場合の結果であり、図は画像が、RGB(255,255,255)の錯視が発生している画像から徐々にRGBと値小さくなっていく場合の結果である。グラフの横軸は、被験者を表し、縦軸は画像のRGBの値を取った。黒丸は各被験者の5回の試行の平均値であり、エラーバーは標準偏差を示す。図中のオレンジ線は、被験者ごとの平均値の平均値を示している。

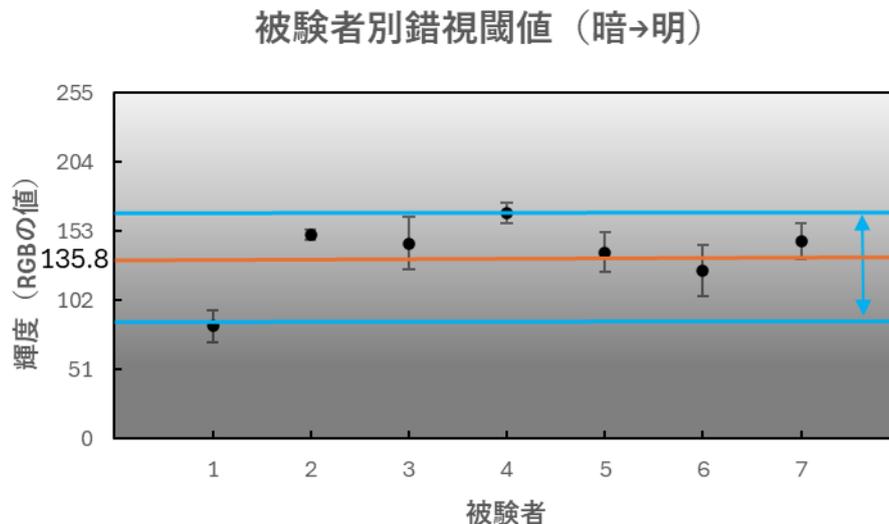


図8-1 コントラスト変化による錯視閾値測定の結果。横軸は被験者を表し、縦軸はRGBの変化の値を表す。また図中のオレンジ線は被験者ごとの平均値の平均、水色の線は平均値の幅を表すつまり、錯視閾値の幅を示す。平均値の幅は59~162.2である。

表 1-1 画像のコントラストを上げた時の被験者ごとの平均値と標準偏差

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
平均	83.2	150.4	144	166.4	137.6	124	145.4
標準偏差	11.9733	4.079216	19.43193	7.418895	14.44438	18.76166	13.2906

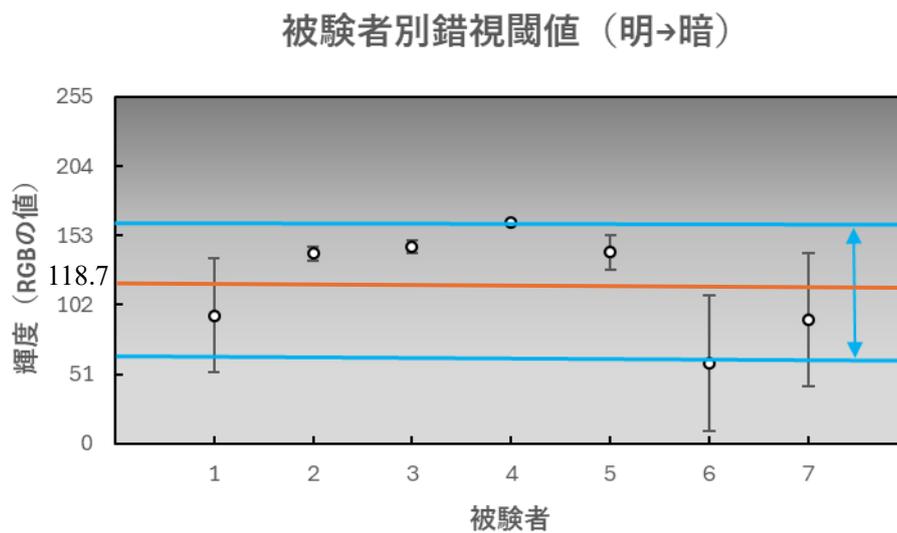


図 8-2 コントラスト変化による錯視閾値測定の結果。横軸は被験者を表し、縦軸は RGB の変化の値を表す。また図中のオレンジ線は被験者ごとの平均値の平均、水色の線は平均値の幅を表し、つまり錯視閾値の幅を示す。平均値の幅は 59~163 である。

表 1-2 画像のコントラストを下げた時の被験者ごとの平均値と標準偏差

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
平均	94.2	139.8	144.6	162.2	140.6	59	91
標準偏差	42.13502	5.3066	4.8	1.6	12.54751	50.08792	49.31531

## 4.1.2 コントラストの変化と錯視効果の関係性

錯視画像を RGB(0, 0, 0)の画像から順位提示した結果と、RGB(255, 255, 255)から提示した結果をグラフに重ねて示した。それぞれの標準偏差が互いに 20 以下の場合に関して 5 回の試行の平均値に着目すると、RGB の値が互いに変わらず定まった値になっている。よって、錯視の発生条件はある一定のコントラストによることが示唆される。

しかし、被験者によってはばらつきが大きくなった。特に RGB(255, 255, 255)の画像から徐々に暗くなり RGB(0, 0, 0)を表示させる実験でそのばらつきが顕著である。

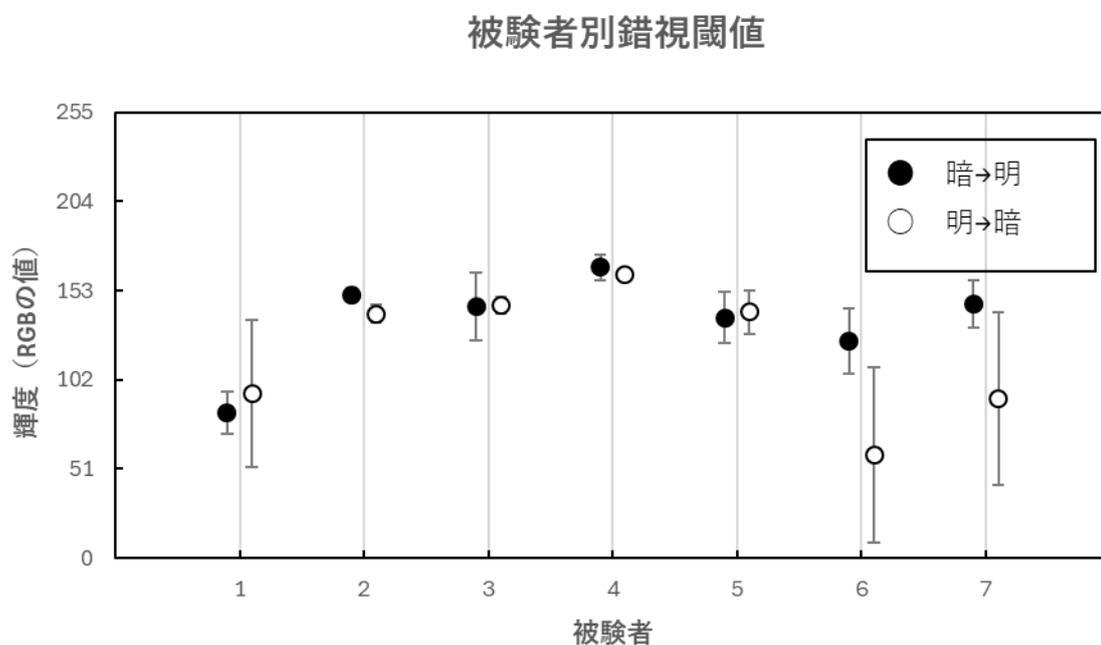


図 8-3 被験者別錯視閾値。錯視の見える条件に一定の範囲が存在する。

## 4.2 RGB の変化による錯視閾値の変化の分析

4.2 節では、蛇の画像をグレースケール化した画像の RGB の値をそれぞれ変化させて、色ごとに閾値の違いを示した。なお、3.2.2 節の実験方法で述べた通り 256 段階のすべての画像を表示させる実験となった。しかし実験の特性上、RGB が変化する値が隣り合っているもの同士を直接比較できない。なぜならば 4 段階ごとに画像を提示して前の画像とその次に提示される画像を比較するからである。そこで錯視量の変化を定量的に表現するために、RGB の変化が 255~251, 250~246, 245~241, ... などのように 4 段階ごとの錯視の変化量を合計してその RGB の平均値を横軸 RGB の変化量とすることで、関数的に錯視の増減を表した。例えば 255~251 の錯視を表現する際はその平均値である 253 を平均値としてグラフ化した。

### 4.2.1 色ごとの錯視強度の変化

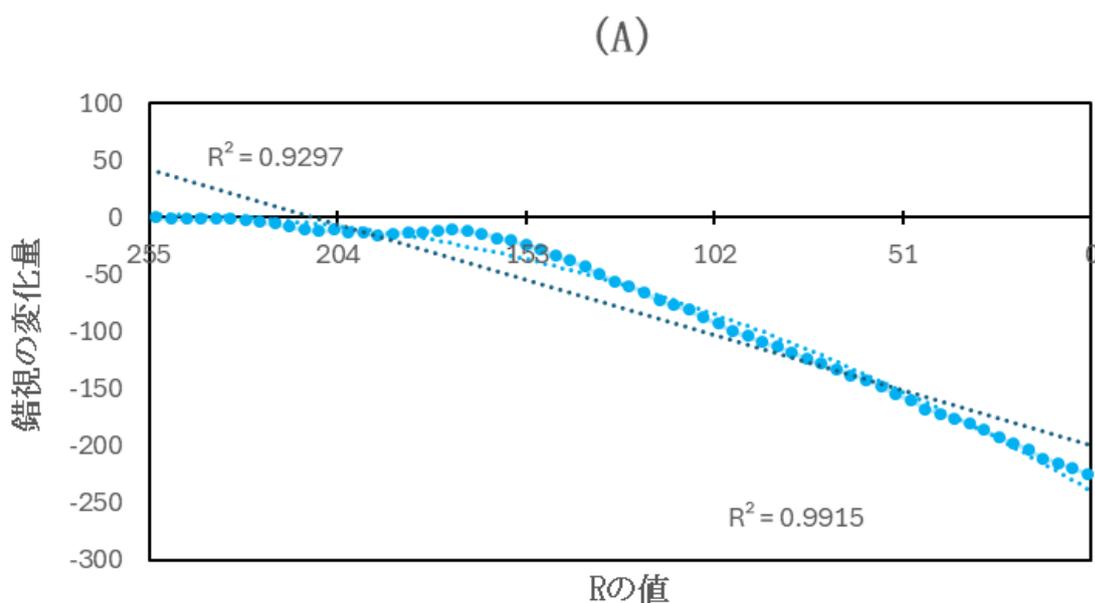


図 9(A) RGB の「R」と「B」成分を変化させた値。横軸は RGB の「R」と「B」成分の 255 から 0 までの変化、縦軸は錯視の変化量である。RGB(154, 255, 154)付近まで錯視量が徐々に増加する傾向にある。

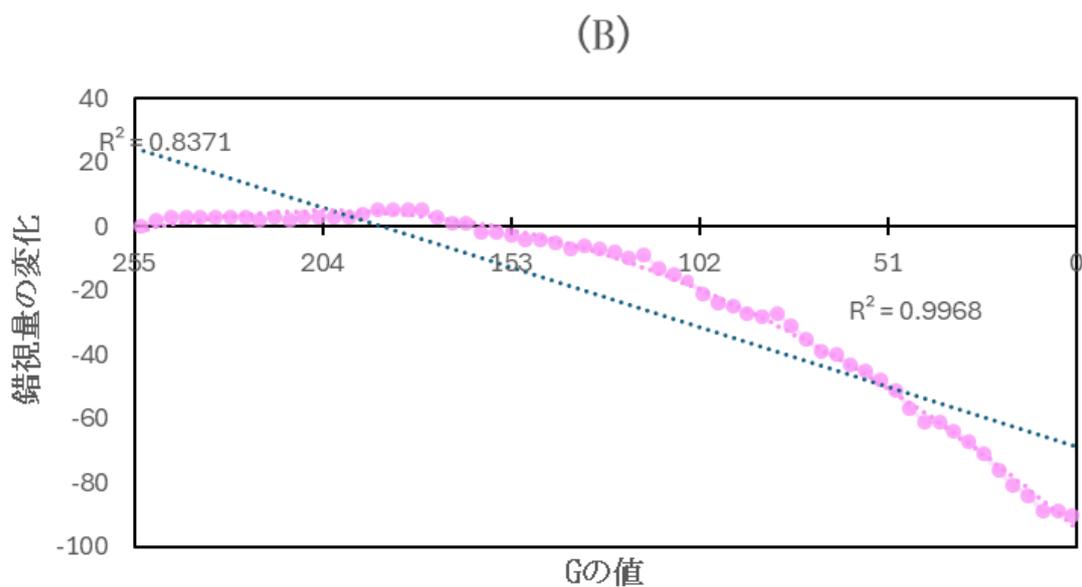


図 9(B) RGB の「G」成分を変化させた値。横軸は RGB の「G」成分の 255 から 0 までの変化、縦軸は錯視の変化量である。RGB(255, 154, 255)付近で錯視量が減少し始める傾向が見える。

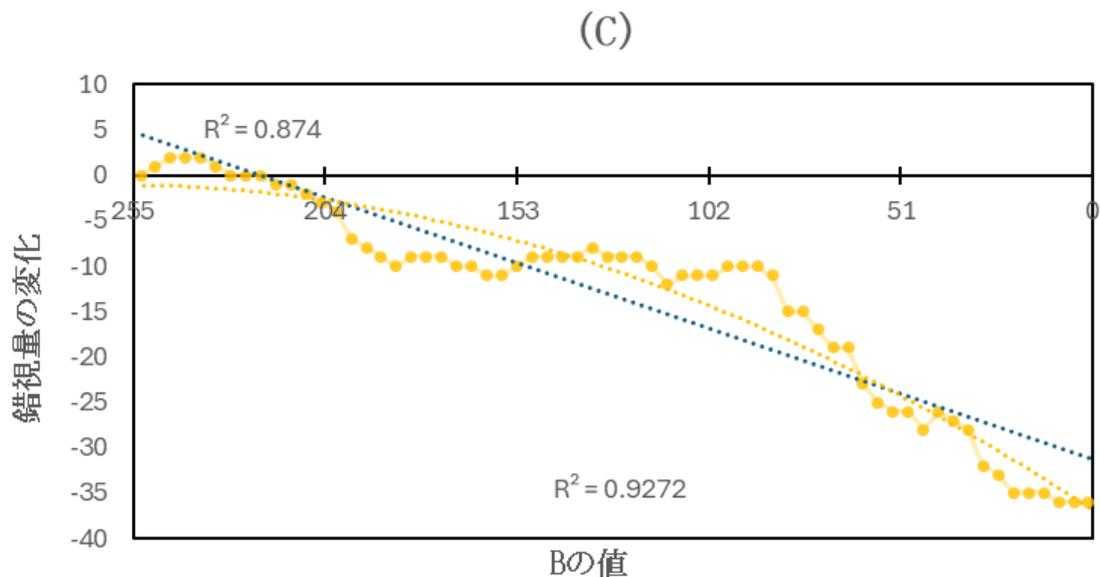


図 9(C) RGB の「B」成分を変化させた値。横軸は RGB の「B」成分の 255 から 0 までの変化、縦軸は錯視の変化量である。RGB(255, 255, 204)と(255, 255, 85)付近で錯視量が減少する傾向が見られた。

(D)

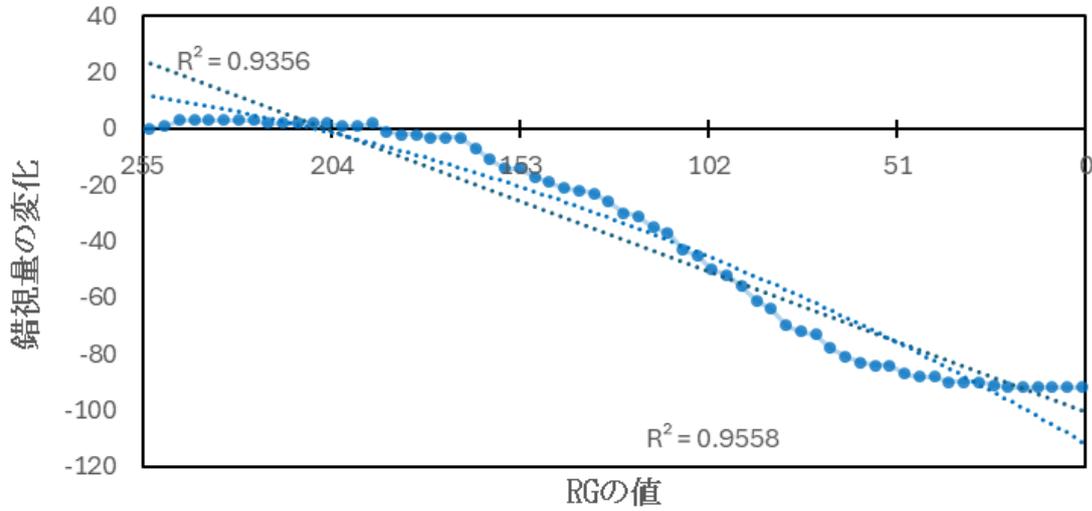


図 9(D) RGB の「R」と「G」成分を変化させた値。横軸は RGB の「R」と「G」成分の 255 から 0 までの変化、縦軸は錯視の変化量である。RGB(165, 165, 255)付近で錯視量が減少し始め、(45, 45, 255)付近で錯視の減少が収まり、錯視量が変わらない結果となった。

(E)

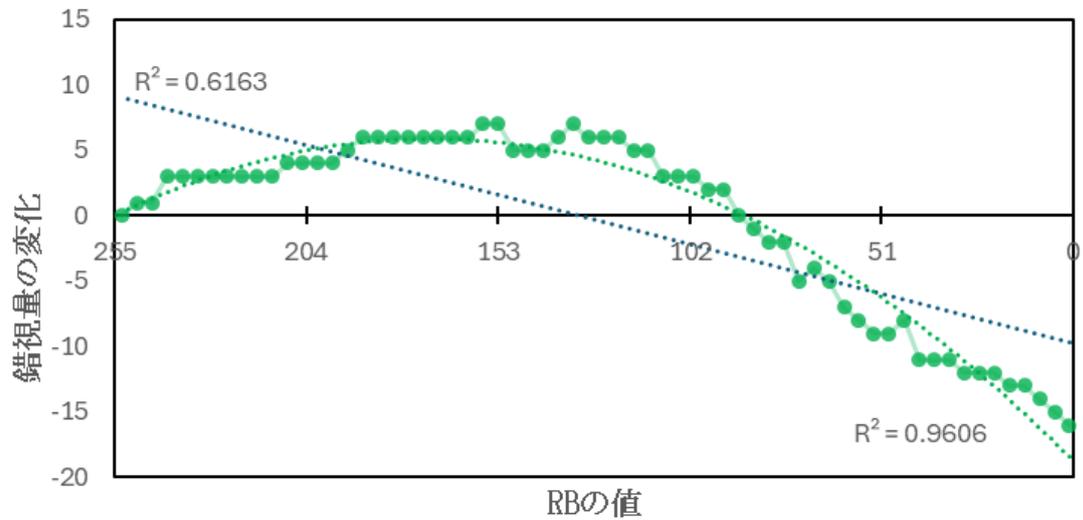


図 9(E) RGB の「R」と「B」成分を変化させた値。横軸は RGB の「R」と「B」成分の 255 から 0 までの変化、縦軸は錯視の変化量である。RGB(154, 255, 154)付近まで錯視量が徐々に増加する傾向にある。

(F)

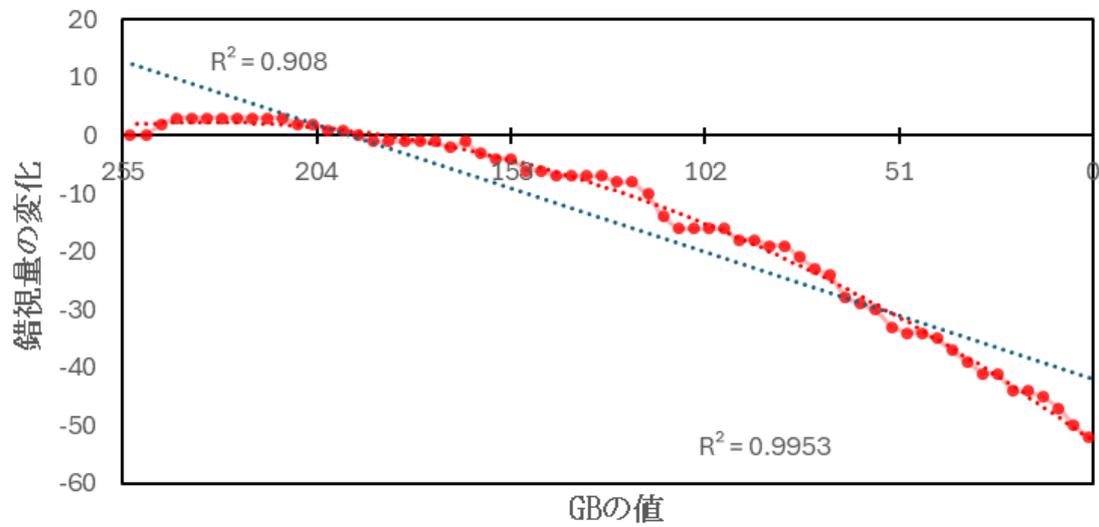


図 9(F) RGB の「G」と「B」成分を変化させた値。横軸は RGB の「G」と「B」成分の 255 から 0 までの変化、縦軸は錯視の変化量である。RGB(255,165,165)付近から錯視量が緩やかに減少する傾向にある。

## RGBの部分的な変化と錯視強度の比較

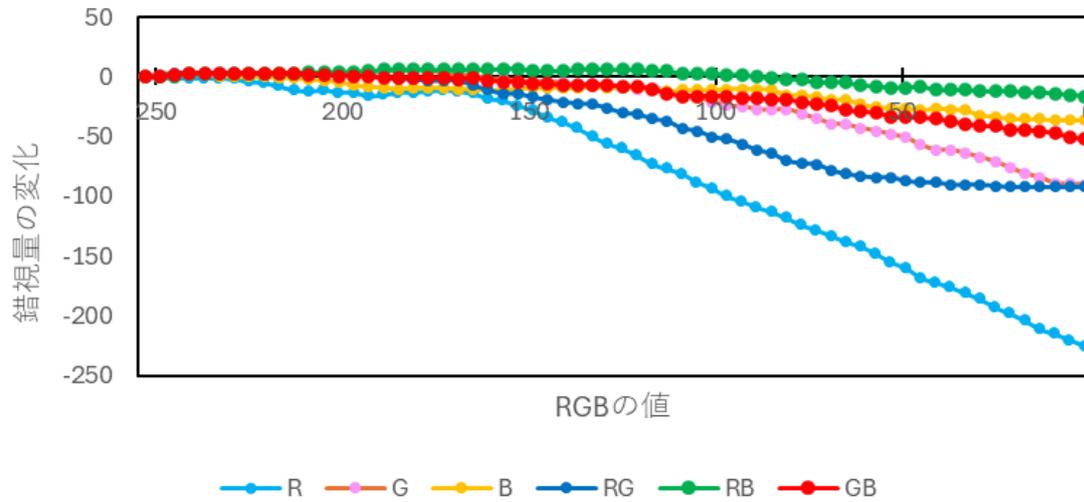


図 10 図 9(A)～図 9(F)のグラフを重ねて色ごとの錯視量変化の強度を比較した図。

表 2 RGB 変化ごとの近似曲線と多項近似(2 次)に対する R2 値

	R	G	B	RG	RB	GB
線形近似	0.9297	0.8371	0.874	0.9356	0.6163	0.908
多項近似(2次)	0.9915	0.9968	0.9272	0.9558	0.9606	0.9953

## 4.2.2 被験者別錯視強度の変化

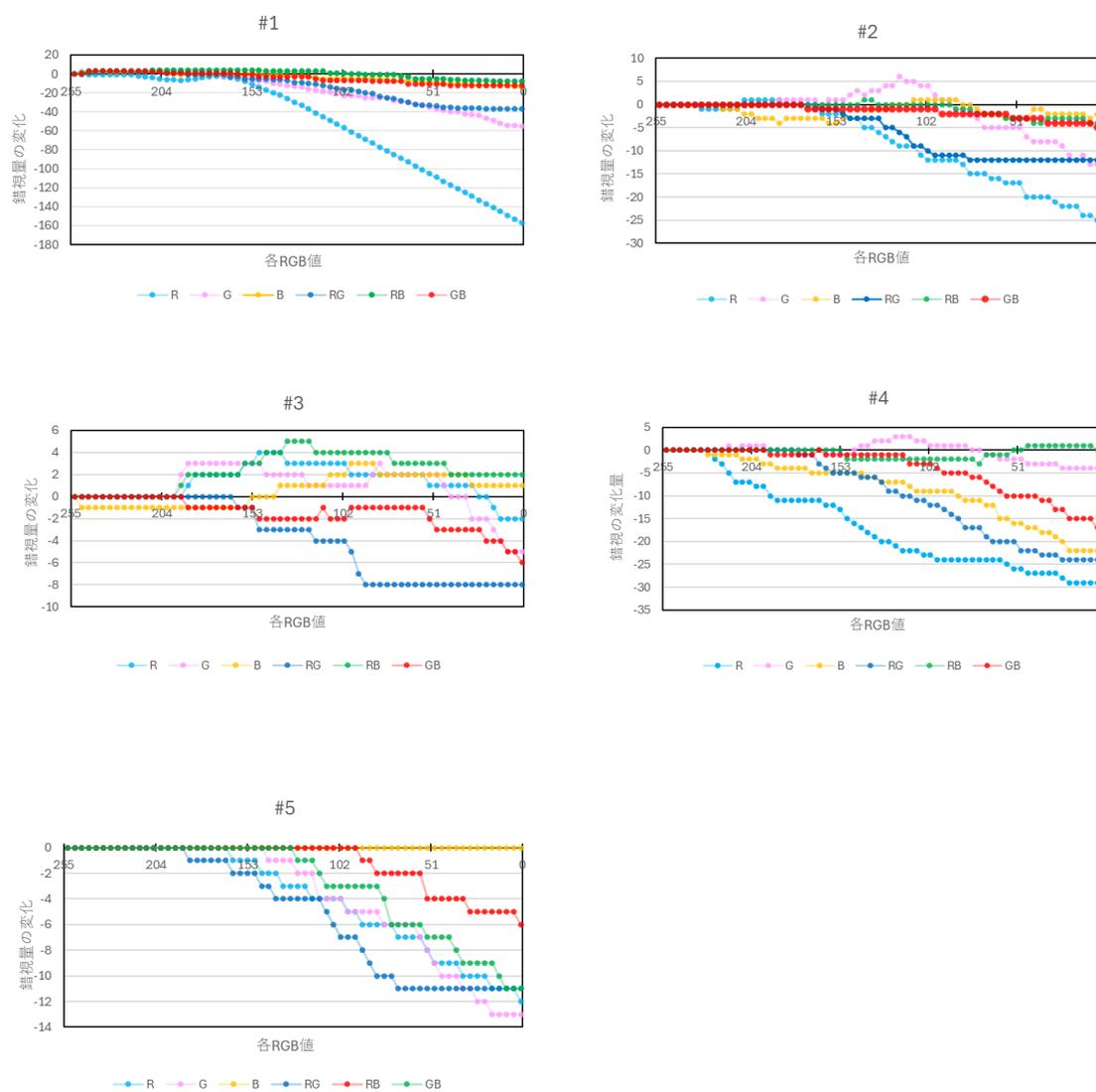


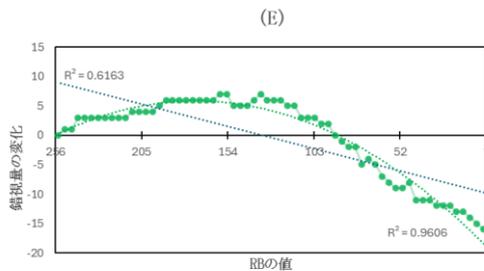
図 11 被験者別の錯視量の変化。

### 4.3 考察

一つ目の実験結果から RGB が(255, 255, 255)の値から(0, 0, 0)の方向へ減少すると、すなわちコントラストが下がると錯視量が減少し、錯視が無くなる境界があることが分かった。これは先行研究の網膜照度が低下したことを支持する結果である。

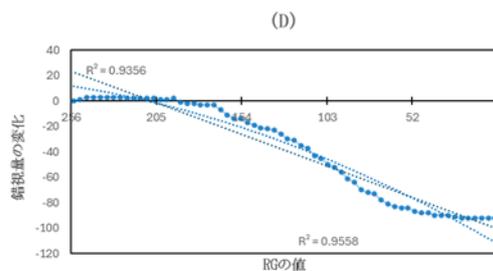
また二つの実験から、錐体細胞と桿体細胞との関連性から錯視強度が変化していることが考えられ、特に桿体細胞の影響がほとんどであることが考察できる。2.4 節で述べたそれぞれの細胞の感度の高い地点の波長に着目したい。L 錐体（長波長）は約 560~580 nm、M 錐体（中波長）は約 534~545 nm、S 錐体（短波長）は約 420 nm~440 nm で感度が高くなっている。また桿体細胞に関しては約 48 nm で感度のピークを示す。このことから各 RGB 変化のグラフについて議論する。

#### ① 「R」と「B」の値を変化させたとき



錯視量が増加する傾向にある。M 錐体の感度が高い 540 nm 付近では桿体細胞の感度がピークに達し、ほぼ一定であるためであると考えられる。よって色の変化は錯視量に大きく影響しないことが示唆される。

#### ② 「R」と「G」の値を変化させたとき



錯視量の変化が RGB(160, 160, 255)付近と (50, 50, 255)付近で切り替わっている。これは S 錐体の感度が高い 440 nm 付近で桿体細胞の感度が急激に減少しているためであると考えられる。よって「R」と「G」を下げた場合も桿体細胞の影響の大きさが示唆される。

## 5 章 結論

グレースケールによる実験により、錯視の閾値は存在する可能性が定量的に示唆された。ただ個人による違いは大きく、一般的な閾値を示すことは難しかった。しかし、本研究では錯視量が減少し、その限界があることを定量的に示した。また回転強度が網膜照度によることを支持する結果も得られた。

また色ごとに錯視の感じ方が異なることが定量的に示された。色 (R,G,B,RG,RB,GB) を使った 6 つの実験に関して、すべての被験者にとって、色の変化が錯視に明確な変化をもたらすことは非常に興味深い。一般に、錯視は減少するか完全に消失する傾向があることがわかる。なかでも、RB 実験の場合 (赤と青の値が徐々に減少し、緑のレベルが一定の場合) には、いくつかの色レベル (グラフではレベル 154 くらいまで) で効果が明らかに増加していることさえあるのは非常に興味深い。推測にはなるがこの要因は、桿体細胞の感度による影響が強いことが考えられる。それは図 9(D)、9(E) で人間の目が捉えた色の波長と、その色を見るために反応するそれぞれの錐体と桿体細胞の感度の関係を読み取ると当てはまる傾向にある。

ただ、錯視の色からの影響が全くないとは言い切れず、それを明らかにするには桿体細胞の影響が少ない方法を考える必要がある。また個人の感覚によらず、より定量的な研究を行うには回転して見える画像をそのまま提示させるのではなく、画像自体を回転させて止まって見えるときを測るなど工夫するべきである。

## 6章 コード

「蛇の回転」錯視をグレースケールへ変換した

File Edit Format Run Options Window Help

---

```
from PIL import Image
# 画像を開く
file_path = "C:/Users/wabin/OneDrive/ドキュメント/work/rotsnake/rotsnake.jpg"
image = Image.open(file_path)
# グレースケールに変換
image_grayscale = image.convert("L")
# 保存
output_path = "C:/Users/wabin/Downloads/rotsnakesstrong3_grayscale.gif"
image_grayscale.save(output_path)

output_path
```

グレースケールの画像を RGB を下げて 256 段階生成した。(RGB をそれぞれ下げる画像を作る際もこのコードの一部を変えて生成した)

File Edit Format Run Options Window Help

```
from PIL import Image
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt # matplotlibを追加

image = Image.open("C:/Users/wabin/OneDrive/ドキュメント/work/rotsnake_grayscale.gif")
image = image.convert('RGBA')

imData = np.array(image)
pixData = image.load()

print("shape of array: ", np.shape(imData))
print("shape of pixData: ", np.shape(pixData))
print("image size: ", image.size)

gg = 255
ggS = 1

while gg > 0:
    for x in range(image.size[0]):
        for y in range(image.size[1]):
            R = pixData[x, y][0]
            G = pixData[x, y][1]
            B = pixData[x, y][2]
            if ((R > (gg - ggS) and R <= gg) and
                (G > (gg - ggS) and G <= gg) and
                (B > (gg - ggS) and B <= gg)):
                nT = (gg - ggS, gg - ggS, gg - ggS, 255)
                image.putpixel((x, y), nT)
                pixData[x, y] = nT

# 画像を保存
image.save(f"C:/Users/wabin/Downloads/{gg}_gRGB.png", "PNG")

# matplotlibで画像を表示
plt.imshow(np.array(image)) # PILイメージをnumpy配列として表示
plt.axis('off') # 軸を非表示にする
plt.title(f"Gray Level: {gg}")
plt.pause(0.00001) # 0.5秒待機
plt.clf() # 次の画像に進むためにクリア

gg -= ggS
print("gg is: ", gg)

plt.close() # 最後にウィンドウを閉じる
```

作った画像を順番に表示するコード

```
File Edit Format Run Options Window Help
|import pygame
|import sys
|import os
|import time
|from openpyxl import Workbook, load_workbook
|
|# Initialize Pygame
|pygame.init()
|
|# Set up the display
|screen = pygame.display.set_mode((0, 0), pygame.FULLSCREEN)
|pygame.display.set_caption('Image Viewer')
|
|# Initialize the mixer for sound
|pygame.mixer.init()
|
|# Sound loading
|sound_path_switch = 'C:/Users/wabin/Downloads/button57.mp3' # 音声ファイル (切り替え音) のパス
|sound_path_space = 'C:/Users/wabin/Downloads/button66.mp3' # 音声ファイル (Spaceキー音) のパス
|
|switch_sound = None
|space_sound = None
|
|# Load the switch sound
|if os.path.exists(sound_path_switch):
|    try:
|        switch_sound = pygame.mixer.Sound(sound_path_switch)
|    except pygame.error as e:
|        print(f"Error loading sound file: {sound_path_switch} - {e}")
|else:
|    print(f"Sound file not found: {sound_path_switch}")
|
|# Load the space key sound
|if os.path.exists(sound_path_space):
|    try:
|        space_sound = pygame.mixer.Sound(sound_path_space)
|    except pygame.error as e:
|        print(f"Error loading sound file: {sound_path_space} - {e}")
|else:
|    print(f"Sound file not found: {sound_path_space}")
|
|# Image loading logic
|def generate_image_paths(base_path, start, end):
|    """Generate a list of image paths incrementally."""
|    return [f"{base_path}/{i}_gRG.png" for i in range(start, end + 1)]
|
|# Settings for image sequence
|base_path = 'C:/Users/wabin/Downloads' # Base directory
|start_image_number = 1 # Start with this number
|end_image_number = 255 # End with this number
|images = generate_image_paths(base_path, start_image_number, end_image_number)
|image_index = 0
|
|# Check if all files exist
|missing_files = [img for img in images if not os.path.exists(img)]
|if missing_files:
|    print("The following files are missing:")
|    for missing_file in missing_files:
|        print(missing_file)
|    pygame.quit()
|    sys.exit()
```

```

def load_image(index):
    """Load the image from the list."""
    return pygame.image.load(images[index])

# Get participant name from user input
participant_name = input("被験者の名前を入力してください: ").strip()
if not participant_name:
    print("名前が入力されませんでした。プログラムを終了します。")
    pygame.quit()
    sys.exit()

# Create timestamp for file name
timestamp = time.strftime("%Y%m%d_%H%M%S") # 日時をフォーマット (例: 20241205_123456)
excel_file_name = f"{participant_name}_{timestamp}_RG.xlsx"

# Save Excel file to a specific path
output_dir = "C:/Users/wabin/Downloads/"
os.makedirs(output_dir, exist_ok=True) # Ensure the directory exists
excel_path = os.path.join(output_dir, excel_file_name)

# Excel file setup
if os.path.exists(excel_path):
    workbook = load_workbook(excel_path)
    sheet = workbook.active
else:
    workbook = Workbook()
    sheet = workbook.active
    sheet.append(["Image Index", "Elapsed Time (s)", "Key"]) # Header row
workbook.save(excel_path)

# Initialize start time
start_time = time.time() # プログラムの開始時刻
last_time = start_time # 前回の操作時間

# Main loop
running = True
set_count = 0 # カウントするセット回数
max_sets = 5 # 最大セット数
image_change_count = 0 # Count the number of image changes
repeat_count = 0 # Number of times the images have been repeated

while running:
    for event in pygame.event.get():
        if event.type == pygame.QUIT:
            running = False
        elif event.type == pygame.KEYDOWN:
            elapsed_time = time.time() - last_time # 前回の操作からの経過時間
            last_time = time.time() # 現在の時間を記録

            if event.key == pygame.K_ESCAPE:
                running = False
            elif event.key == pygame.K_RIGHT: # 右矢印キーで次の画像
                image_index = (image_index + 4) % len(images)
                image_change_count += 1 # Increase image change count
                if image_change_count == 1: # 1回目の切り替えでセットカウントを1回増加
                    set_count += 1
                    image_change_count = 0 # Reset the image change count
                    if set_count >= max_sets: # 最大セット回数に達した場合停止
                        running = False
            if switch_sound:
                switch_sound.play() # 切り替え音を再生

```

```

# Excelに記録
sheet.append([image_index + 1, round(elapsed_time, 2), "Right Arrow"])
workbook.save(excel_path)
print(f"Saved: Image Index = {image_index + 1}, Elapsed Time = {round(elapsed_time, 2)} seconds, Key = Right Arrow")

elif event.key == pygame.K_LEFT: # 左矢印キーで前の画像
    image_index = (image_index - 4) % len(images)
    image_change_count += 1 # Increase image change count
    if switch_sound:
        switch_sound.play() # 切り替え音を再生
    # Excelに記録
    sheet.append([image_index + 1, round(elapsed_time, 2), "Left Arrow"])
    workbook.save(excel_path)
    print(f"Saved: Image Index = {image_index + 1}, Elapsed Time = {round(elapsed_time, 2)} seconds, Key = Left Arrow")

elif event.key == pygame.K_LSHIFT or event.key == pygame.K_RSHIFT: # Shiftキーで特定動作
    if switch_sound:
        switch_sound.play() # 切り替え音を再生
    # Excelに記録
    sheet.append([image_index + 1, round(elapsed_time, 2), "Shift"])
    workbook.save(excel_path)
    print(f"Saved: Image Index = {image_index + 1}, Elapsed Time = {round(elapsed_time, 2)} seconds, Key = Shift")

elif event.key == pygame.K_SPACE: # Spaceキーで特定の音を再生
    if space_sound:
        space_sound.play() # Spaceキー音を再生
    # Excelに記録
    sheet.append([image_index + 1, round(elapsed_time, 2), "Space"])
    workbook.save(excel_path)
    print(f"Saved: Image Index = {image_index + 1}, Elapsed Time = {round(elapsed_time, 2)} seconds, Key = Space")

```

```

# Display the image
screen.fill((0, 0, 0)) # 背景を黒でクリア
try:
    image = load_image(image_index)
    image = pygame.transform.scale(image, (screen.get_width(), screen.get_height()))
    screen.blit(image, (0, 0))
except pygame.error as e:
    print(f"Error loading image: {images[image_index]} - {e}")

# Display the repeat count and current set
font = pygame.font.Font(None, 36) # テキスト表示用フォント
text = font.render(f"Set: {set_count + 1} / {max_sets}", True, (255, 255, 255)) # 白文字
screen.blit(text, (10, 10)) # 画面左上にテキストを表示

# Update the display
pygame.display.flip()

# Clean up
pygame.quit()
sys.exit()

```

## 7 章 参考文献

北岡明佳・蘆田宏『近年の錯視研究の展開－巻頭言に代えて－』 *Japanese Psychological Review* 2012, Vol. 55, No. 3, 289-295

*Japanese journal of optics : publication of the Optical Society of Japan* 39 (2), 66-74, 2010-02

大阪大学大学院人間科学研究科紀要. 2015, 41, p. 213-228

立命館文学 636 1163-1156, 2014-03 立命館大学人文学会

久方 瑠美・村上 郁也『蛇の開店錯視におよぼす偏心度および網膜照度の影響』 *VISION* Vol. 19, No.2, 115-118, 2007

Akiyoshi KITAOKA and Hiroshi ASHIDA, “Phenomenal Characteristics of the Peripheral Drift Illusion”, *VISION* Vol.15, No.4, 261-262, 2003)

Alex Fraser & Kimerly J.Wilcox, “Perception of illusory movement”, *Nature* Vol. 281 18 October 1979

Ikuya MURAKAMI, “Visual Illusions as Tools for Vision Research”, *Japanese journal of optics : publication of the Optical Society of Japan* 39 (2), 66-74, 2010-02

松下、戦具『フレーザー・ウィルコックス錯視の近年の研究動向』大阪大学大学院人間科学研究科紀要. 2015, 41, p. 213-228

Eric R. Kandel, John D. Koester, Sarah H. Mack, Steven A. Siegelbaum 編, 日本語版監修 宮下保司,『カandel神経科学第2版』株式会社メディカル・サイエンス・インターナショナル

『新編色彩科学ハンドブック』第2版 日本史記載学会編(財)東京大学出版会(1998年)

北岡明佳の錯視のページ「<https://www.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/>」(最終アクセス 2025/01/31)

## 8 章 謝辞

本研究を進めるにあたり、丁寧な指導を賜りましたミケレット教授に心から感謝いたします。先生の適切な助言や支えなしでは、本研究は成り立たずこのような論文にまとめ上げることができませんでした。本当にありがとうございました。また、学部3年の頃からプログラミングの知識が乏しい私に、懇切丁寧な指導をしてくださった吉田さんにも重ねて感謝申し上げます。更に研究方法や知識が不足している私に、声をかけて進捗を確認してくださった及川さんには感謝しきれません。私の質問にいつでも快く答えて下さり、及川さんから数多くのアドバイスをいただきました。また、研究がうまくいかず手詰まりになった際には、及川さんの研究内容に対する豊富な知識と、アイデアに何度も助けていただきました。本当にありがとうございました。同期のメンバーである野沢君にはいつも触発されています。研究室の皆さんとも、毎週のゼミ活動を通して多くの議論を交わしました。それが私の刺激となり、皆さんと切磋琢磨することで研究を有意義に進めることができました。ありがとうございました。最後にはなりませんが、本研究の実験を実施するにあたり、お忙しい中時間を見つけ、実験への参加を快く引き受けてくださった被験者の皆様に、心より感謝申し上げます。皆様の実験への参加なしには、本研究を行うことは出来ませんでした。ありがとうございました。