

1 ベンハムのコマ（色が見える条件と理由について）

1. 研究の動機

私たちは、不思議な模様が描かれたベンハムのコマ（図1）が顧問の先生の机の上に置かれているのを見つけた。コマを回転させると、白と黒の色しか描かれていないのに色がついて見えた。その現象について非常に興味を持ち、コマにはどのような色が確認できるのか、また、どのようにして色がついて見えるのかを調べたいと思い、研究をすることにした。



図1：ベンハムのコマ

2. ベンハムのコマについて

ベンハムのコマとは、図1のような黒と白のみで描かれた模様のあるコマのことをいう。

このコマは1895年イギリスのおもちゃ屋さんのチャールズ・ベンハムがこのようなコマを売り出したことで有名になり「ベンハムのコマ」と呼ばれるようになったということである。実に、100年以上も前からこのような現象は知られていたのである。

この現象は錯視（目の錯覚）によって色がついて見えるという説明がされていたが、実際にはどのようにして色が見えているのか、詳しく分かってはいないようである。

3. 研究の目的

コマに色がついて見える仕組みを解明するために、コマの回転数と見える色の関係、コマの模様のパターンと見える色の関係等について調べる。

さらに、コマに色がついて見えるのは「錯視である」あるかどうかを調べ、色の見える理由を考察する。

4. 研究方法

(1)回転台の製作

コマを一定の回転数で回すために、図2のような回転台を製作した。この回転台はモーターにCD盤をつけたもので、回転を低速で安定させるために、遊星ギアを組み込んだギアボックス（タミヤ製）を取りつけた。コマの回転数は、電圧と電流を調節してコントロールした。さらに、フォトインタラプターと周波数カウンターを使用して、コマの回転数を測定することができるようにした。

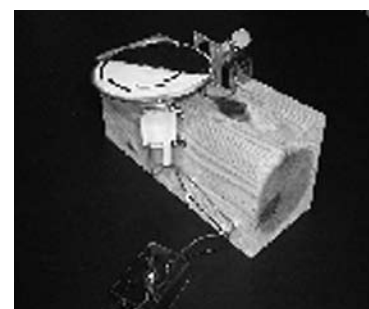


図2：回転台

(2)色の決定

色の観察は4人で同時に行い、日本色彩研究所監修の配色カードを使用して、コマを回した時に見えた色に一番近い色をその時の色に決めた。

コマの回転する速度を変え、どのような色が見え、また、どのように見える色が変わるのかを調べることにした。

5. 研究結果

(1) コマの模様のパターン、回転数と見える色の関係について

ア 実験1：回転数と色の関係

① 実験の方法

図3のパターンのコマを回転させ、回転数を変えた時に、それぞれのラインがどのような色に見えるかを、配色カードを用いて同定する。



図3

② 結果

毎分0～100回転ぐらいまでははっきりとした色を確認することはできず、全体に黒っぽい色だが、毎分100回転ぐらいから徐々に色が見えてくる。また、このパターンでは毎分330回転～350回転ぐらいの時が一番はっきりと色を見ることができ、ラインごとに色が異なり、赤や緑、黄などの色が見えた。回転数を上げると、色は薄く見えるようである。しかし、これは明度に変化しているだけかもしれない。

イ 実験2：黒のラインの位置と色の関係

① 実験の方法と予想

図4のように、コマの外側の2つのラインを入れ替えたパターンを作成し、回転させて色の変化を観察する。もし、色が、回転数、黒と白のパターン、その割合と場所によって決まるのであれば、外側の2つの色が入れ替わるはずである。

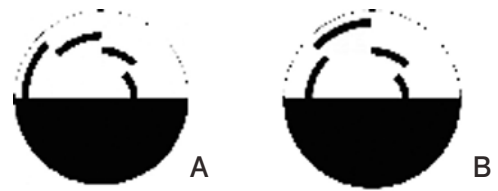


図4：外側の2つを入れ替えたパターン

② 実験の結果

外側の2つの色が入れ替わり、仮説が証明できた。

ウ 実験3：回転数と色の関係

① 実験の方法と予想

色の違いは黒のラインのパターンと回転数によることを確かめるために、図5のように、元のパターンとパターンを2倍にしたものを作成し、回転数を変えて、見える色を観察する。

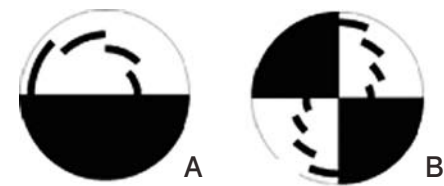


図5

模様を2倍にして、回転数を2分の1にすれば、

白と黒の割合が同じ状態を観察することになるので、同じ色が観察されると予想される。

② 実験の結果と考察

Aを毎分660回転、Bを毎分330回転で試したところ、予想通り、同じ色のパターンを観察することができた。コマについて見える色は、白と黒のパターンと回転する速さによって決まっているといえる。

(2) 色が見える理由について

コマに色がついて見えるのは、実際に色が現れているのか、錯視によるものなのかを調べるために写真を撮影するなどしてみたが、断定することはできなかった。そこで、色が見える理由について、次の4つの仮説を考え、それぞれについて検討することにした。

- ・ 仮説1：回転している白黒のパターンに光が当たり、その光が散乱され、特定の色が見える。
- ・ 仮説2：回転している白黒のパターンに光が当たることで、反射光の波長自体が変化するために色がついて見える。
- ・ 仮説3：白黒のパターンの視覚が、光の刺激のON - OFFのように目に入り、このリズムが特定の色波長の振幅と同じように認識され、色がついて見える。
- ・ 仮説4：色がついて見えるのは、錯視による。

ア 実験1：光源の種類と見える色の関係

仮説1を確かめるために、光源の種類を変えて、コマに色がついて見えるかを調べる。

①実験の方法

光源に、単色光源であるナトリウムランプ、発光ダイオード（赤、青、緑）を使用し、単色光源下でもコマに色がついて見えるかを調べる。

②実験の結果と考察

単色光源下でも、コマに色がついて見えた。コマの色の見え方は蛍光灯を光源として見た時と同じようにラインが繋がって見え、各ラインで異なった色が見えた。また、回転を反転させると蛍光灯を光源としたときと同様にコマのラインの色の並びは反転した。

光源を単色光に変えても色がついて見えることから、仮説1は誤りであると考えられる。

イ 実験2：分光器による観察

仮説2を確かめるために、コマのラインの部分の反射光を分光器を使用して観察する。

①実験の方法

単色光の光源を使用し、暗室でコマを回転させ、各ラインのスペクトルを「直視分光器」と「分光器カラーテレビ装置」で撮影した画像で観察する。

②実験の結果と考察

肉眼では色がついて見えるが、光源の種類を変えても、反射光のスペクトルに変化は見られなかった。黒のライン上では光が反射しないため、スペクトルが明るくなったり、暗くなったりするだけであった。

反射光を見てもスペクトルの変化がなく、反射光の波長は変化していないことから、仮説2は誤りであるといえる。

ウ 実験3：観察する部分と、見える色の関係

①実験の方法

筒を覗いてコマのラインのみを観察する。

塩ビ管の内部に黒紙を巻き管内での光の反射を防ぎ、回転しているコマのラインのみを観察する（図6）。観察するコマのパターンは、図3とし、光源は赤の単色光源を用いた。

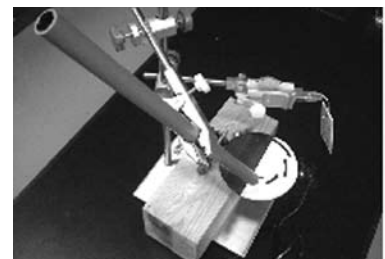


図6

②実験の結果と考察

筒を通してコマの黒いラインのみを視野に入れて見ると、ラインに色はついて見えなかった。このことから、白・黒が交互に現れるだけでは色は見え、仮説3は成り立たない。

しかし、筒を通して、黒のラインと周囲の白い部分を同時に視野に入れて見ると、コマ全体を見ているときと同様に、ラインに色がついて見える。

以上のことより、コマに色がついて見えるためには、黒のラインと周囲の白地の部分が大切で、色が見えるのは「錯視」であると考えられる。

(3)錯視が起こる理由について

「赤」の単色光源下での実験を繰り返しながら、どうして錯視が起こるか考えていたところ、「緑」が見えることに気がついた。

「赤」と「緑」は補色の関係にあるため、単色光源下での錯視には補色に関係しているのではないかと考えた。補色とは、色彩学の定義では「足して（加法混色して）白になる色」のことで、例えば、「赤」に対して「緑」、「青」に対して「黄」の色のことをさす。

ア 単色光源下で、錯視が起こる理由の考察

図3のパターンのコマを、赤色光源下で時計回りに回転させた時の、最も外側のラインとその周囲は、図7のようなパターンを繰り返し見ていることになる。

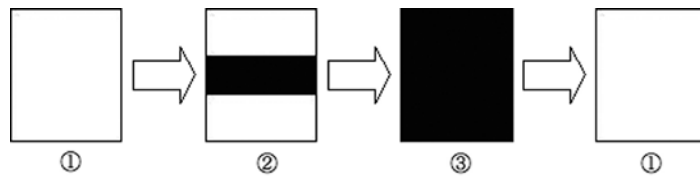


図7

①の部分に赤色光が当たり、赤に見えるが、赤い光に目が慣れていき、赤に対する感度が落ち、実際は赤だが白っぽく認識する。

①から②に移ると、黒いラインが現れてその部分の赤が消え、赤の補色である緑が見える。しかし、ラインが黒なので、はっきりした緑はわからず、周囲の白地に接したところで、周囲の赤に對比する形で見える。このため、鮮やかな緑ではなく、やや黒っぽい緑となる。

③に移ると、すべての赤が消え全面が同じ黒になるため、色が消える。コマの色がリセットされ再び①に戻り、この流れを繰り返す。

②のように、周囲の白地の中に、黒が現れることが重要で、ここに赤色光源の補色である緑が錯視として生じ、緑のラインが見える。

イ 回転方向を変えると、色に変化する理由の考察

さらに、コマを反時計回りに回転させると、最も外側のラインは、「緑」から「赤」に変化する。錯視により、緑に見えていたものが赤に変化する理由についても次のように考えてみた。

図3のパターンのコマを、赤色光源下で反時計回りに回転させた時の、最も外側のラインとその周囲は、図8のようなパターンを繰り返し見ていることになる。

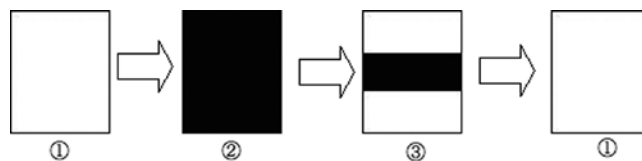


図8

①の部分に赤の光が当たり、赤に見えるが、赤い光に目が慣れていき、赤に対する感度が落ち、実際は赤だが白っぽく認識する。

①から②に移ると、すべての赤が消え前面が黒になるため、色が消える。周囲に白がないため、緑の補色は見えない。

③に移ると、両側の白地の部分に赤色光があたり、赤く見えるが、赤い光に目が慣れていき、赤に対する感度が落ち、実際は赤だが白っぽく認識する。

③から①に移ると、今まで色がなかったところ（色を認識していなかったところ）に赤色光があたり、赤の感度が高まり、赤いラインが認識される。

このようにして、実際は何もないところに錯視により赤いラインが見える。

やはり、白地の中に黒いラインがあることが重要で、周囲より遅れて光が反射してくることにより、その部分に光源の色がついて見えると考えられる。

(4)見える色の予測、赤色光源以外での色の見え方について

(3)より、もしコマの色が補色によって見えているならば、赤色光源だけでなく、青色光源、緑色光源、黄色光源でも補色の色や光源の色が見えるはずである。

ア 見える色の予測

次の色が予測されるので、光源の色を変えて、見える色を観察する。

A：時計回り外側のライン、反時計回り内側のライン → 光源の補色が見える

B：反時計回り外側のライン、時計回り内側のライン → 光源と同じ色が見える

イ 結果と考察

光源の色が赤および緑では、仮説で説明できる色が確認された。光源の色が青の場合、Aでは補色は確認できたが、Bでは光源の色とは少し違った感じだった。光源の色が黄の場合、Aでは完全な補色とはいえなかった。Bでは光源の色とは少し違った感じだった。

以上のことから、単色光源による色の見え方の一つの理由に、補色の効果があると考えられる。しかし、黄色光源の場合は、完全に補色が現れたとはいえなかった。これは、「黄」が、光の三原色ではないため、他の色と認識の仕方が異なっているのかもしれない。

(5)ベンハムのコマ以外での色の見え方

(4)、コマに色がついて見えるには、コマのラインのパターンが、ベンハムのコマのようになっていれば必ずしも円形でなくとも同じ色がついて見えるのではないかと考え、確かめることにした。

ア 実験の方法

図9のように、ベンハムのコマのパターンを引き伸ばした帯状のパターンを製作した。



図9：円筒の展開図

このパターンを円筒に巻きつけ、回転させて見える色を観察し、ベンハムのコマの場合と比較する。

イ 結果と考察

円筒形のパターンとベンハムのコマで見た色は同じだった。光源を、単色光に変えても同様の結果であった。このことから、錯視で生じる色は、白と黒のパターンとその割合、そしてこれらのパターンをどんな順番で、どのくらいの速さで見るかによって決まると考えられる。

6. まとめと今後の課題

ベンハムのコマを回転させたときに見える色は、白と黒の模様配置によることで変化すること、回転速度によっても色が変換すること、コマの回転方向を変えると色の見え方が反転することなどがわかった。

また、単色光源にしても色がついて見えることなどから、ベンハムのコマに色がついて見えるのは、「錯視」によることが分かった。黒のラインの周囲が白地であることが、錯視を生じさせている重要な要素であることも確認できた。そして、錯視が原因とするならば、色が見える一つの理由として、補色が関係しているのではないかという仮説を立てることもでき、自分たちで色の見える理由の一つを説明することができた。

一方で、ベンハムのコマではないパターンでは、色のついた写真も撮影されている。白と黒のパターンを回転させることで色が見える理由は、とても複雑であると考えられる。

色の判別では、色の明度や彩度を細かく比較することができなかった。今後は、明度や彩度を判別できるように、色の識別の仕方を工夫していきたい。

また、単色光源でも、2番目と3番目のラインの色の見える理由については説明することができなかった。これらのことについても詳しく調べてみたい。

7. 参考資料

(1)ベンハムのこま－実験と考察 みんなの実験室7 横山玲子

(<http://www2.tokai.or.jp/seed/seed/minna7.htm>)

(2)Benham's Disk University of Washington Eric H.Chudler,Ph.D.

(<http://faculty.washington.edu/chudler/benham.html>)

(3)「眼は何を見ているか 視覚系の情報処理」池田光男,平凡社(1988)

(4)「どうして色は見えるのか 色彩の科学と色覚」池田光男・芦澤昌子,平凡社(1992)

(5)「理科年表 平成20年」丸善株式会社