

11 ベンハムのコマ（色が見える条件について）

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のを見つけた。その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付いて見えた。その現象について非常に興味を持ち、コマにはどのようにして色が付いているのか、また、どのような色が確認でき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のように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ス・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。

この現象は目の錯覚によるもので色が付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、コマの模様の長さと見える色の関係について調べる。

さらに、コマに色が付いて見えるのは「錯覚である」とされているので、写真撮影などの「目」で見る以外のものでも色を確認することができるかどうかなどを調べ、目の錯覚であるかどうかを検証したい。

4 研究方法

コマのパターンの図を一定の回転数で回転させ、その時に見える色を観察する。

(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盤を取り付け木材に固定したものである。コマの回転を低速で安定させるために、モーターに遊星ギアを組み込んだギアボックスを取り付けた。また、コマの回転数は、電源装置からの電圧と電流を調節して、コントロールする。

さらに、コマの回転数を測定するために、フォトインタラプターを回転台に取り付けた。フォトインタラプターと周波数カウンターを組み合わせ、CD盤の端に取り付けた付箋が、フォトインタラプターの出す赤外線を一定の速さで遮った数を計測することでコマの回転数を知ることができる。

今回の実験ではコマの回転数を全て1分間あたりの回転数（rpm）で計測した。

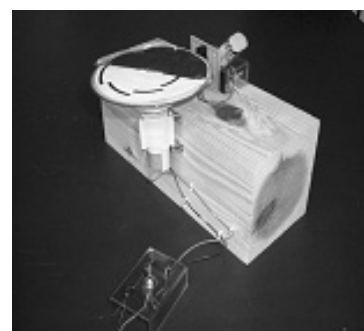


図2 回転台

(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。

これらを用いて、コマの回転するスピードを徐々に速くしていき、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、その時に見える色を調べる。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。

② 結果

0～100回転（rpm）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、100回転（rpm）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330回転～350回転（rpm）ぐらいの時が一番はっきりと色を見ることができた。

例として、一番外側のラインに見えた色と回転数との関係を示す。なお、色の名前（英字）と記号は、日本色彩研究所監修の配色カードのものである。

- ・0～100回転（rpm）…………なし（黒）
- ・100～500回転（rpm）…………olive（dk-8）
- ・500～800回転（rpm）…………dark grayish brown（BR-5）
- ・800～950回転（rpm）…………dark grayish brown（BR-6）
- ・950～1000回転（rpm）…………dark grayish brown（BR-7）

さらに、回転数を上げると、薄く、明るい色になっていく。しかし、これは色が変わるというより、明度が変化していくとも考えられる。

イ 実験2：黒のラインの位置と色の関係①

実験1より、一定の回転数であっても、外側のラインと内側のラインの色は違って見える。これは、ラインが外側にあるか内側にあるかによるか、または白と黒のパターンの違いによると推測されるので、その原因を探る。

① 実験の方法

図4のような同じ角度の中に白と黒の割合が等しく描かれているパターンを2つ作成し（A，B）これを回転させて、色の見え方を確認する。

② 予想

コマを回したときに見える全てのライン

上の白と黒のパターンの割合が等しいことから、A，Bともに、それぞれのコマで見えるラインの色はすべて同じであろうと予想した。

③ 実験の結果と考察

予想通り、A，Bそれぞれのコマで、全てのライン上で同じ色を観察することができた。回転数を変化させると全てのラインの色は同じように変化した。また、A，Bのようにパターンが異なると、同じ回転数でも、見える色は異なる。このことから、色の変化は、黒のラインが



図3

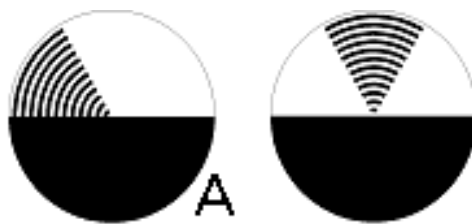


図4 同じ角度の中に白と黒の割合が等しく描かれているパターン

どの場所に描かれているかによって色がわかった。同じ角度のパターンでも、パターンの場所によって色は異なる。色の変化は黒のラインの外側、内側によるものではない。

ウ 実験3：黒のラインの位置と色の関係②

実験2の結果、色の違いは黒のラインのパターンの違い（内側・外側ではなく）によることを確かめるために次のような実験を行った。

① 実験の方法

図5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。



図5 外側の2つを入れ替えたパターン

② 予想

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。

③ 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。

エ 実験4：回転数と色の関係

実験2の結果、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次のような実験を行った。

① 実験の方法

図6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6

② 予想

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という状態を観察することになるので、同じ色が観察されると考えられる。

③ 実験の結果と考察

Aを660回転（rpm）、Bを330回転（rpm）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) 回転の向きと、見える色の違いについて

実験をしている過程で、回転の向きと色の関係について疑問が残った。回転の向きを変えてみると、回転数は同じでも、外側と内側が反転したのである。

同じ模様なのに、回転方向を変えるだけで、なぜ色が変わって見えるのか、またなぜ内側と外側の順序が変わるのがわからなかった。そこで、回転の向きと色の関係についても調べてみた。

ア 回転を反転することによる色の違いについての考察

一番外側のラインについて考えてみると、図7の左側の図が回転するということは、図7の右側のような黒と白のパターンを交互に見ていることになる。これではどちらに回転させても、全く同じパターンを見ていることになり、色の変化が理解できない。



図7

では、時計回りに回転させたときと、反時計回りに

回転させたときでは、何が異なるか考えてみると、図7の黒ベタの部分の見方が異なっている。そこで、色が変わるのは、この黒ベタの部分に関係していると考えられる。

そこで、この黒ベタの部分が、色の見え方にどのように関係しているかを調べることにした。

イ 実験5：黒ベタの部分の影響と色の見え方

① 実験の方法

図8のようなパターンを作成し、実験をした。

それぞれのコマを回転させ、黒のラインがつながって見える回転数で、その時の色を観察することにした。

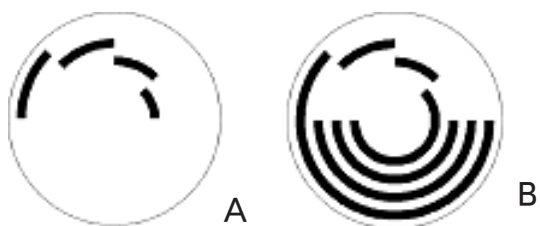


図8

② 実験の結果と考察

図8の左のパターンでは、550回転以上になるとラインがつながって見えるが、色を確認することはできなかった。ラインは黒くはならず、灰色に見えた。

図8の右のパターンでも、350回転以上で黒のラインになるが、色はついて見えず、また反転させても色を確認することはできなかった。

以上のことから、色が付くことには黒ベタの部分が深く関わっていることが分かった。

さらに図8の右のパターンでは、回転数を上げ660回転以上になると、2本目と3本目のラインに色がついて見えた。そして、回転の向きを反転させると、最も外側と最も内側のラインの色はそのまま変わらず、2本目と3本目の色が入れ替わった。

この結果には、大変驚いた。なぜこのようなことが起こるのか、分かっていないので、今後も研究を続けて行きたいと思う。

(3) 色が見える理由について

インターネットを調べてみると、ベンハムのコマではないが、白と黒のパターン(図9)だけでも色のついた写真が取れるという報告があった。(ベンハムのコマ—実験と考察, みんなの実験室7 横山玲子)しかし、ここでもベンハムのコマでは、色は写らないということで、目の錯覚であるとの説明がされていた。

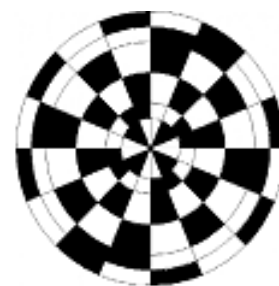


図9 色の写ったパターン

白と黒のコマで色がついた写真が撮れるものがあるのに、ベンハムのコマでは本当に色のついた写真が撮影できないのか、実際に写真を撮影してみることにした。

もし、色のついた写真が撮影できれば、実際にその色が出ている可能性が考えられる。

ア 実験6：写真での撮影

① 実験の方法

コマの回転数は、肉眼で最も色がはっきり確認できる一分間あたり330回転とし、以下のデジタルカメラ、フィルムカメラ、教材提示装置を使って撮影をした。

デジタルカメラ：富士フィルム FinePix A310

フィルムカメラ：ミノルタ α303 si Super

フィルムは富士フィルムのセンチュリアA S A400を使用した。

教材提示装置：ケニス株式会社 フレキシブル教材提示装置

教材提示装置で撮影した画像をパソコンに取り込んだ。

② 実験の結果と考察

・デジタルカメラでの撮影

デジタルカメラでは、色は確認できなかった。

・フィルムカメラでの撮影

コマの回転数はそのまま、シャッタースピード、絞りを変えて撮影を行ったが、プリントされた写真には、色は写っていないかった。

- 教材提示装置での撮影

教材提示装置で動画を撮影し、コマ送りをしながら1コマずつ確認した。

すると、青っぽい色と、赤っぽい色のついた画像が確認できた。しかし、その画像をよく見てみると、色の写り方が肉眼で見たときのように、内側と外側で色が異なっているのではなく、内側も外側も、それぞれの線のところで青と赤に色がついており、肉眼で見たものとは異なった色の写り方をしていた。

- フィルムカメラで撮影したネガの分析

写真のプリントでは、印画紙に焼き付ける際に、色の補正が行われる可能性があるので、写真のネガをスキャナーでパソコンに取り込み、その画像を調べてみることにした。

その結果、コマの内側と外側とで色が異なっているようなものが見つかった。

このようなことから、色が見えるのは錯覚ではないと断言はできないが、実際に、色が現れている可能性があると考えられる。

錯覚との相互作用によるのかもしれない。色が見える理由は、単純ではないようである。

また、カメラの受光部の色の感受の仕方に差があるかもしれないので、調べる方法を工夫していきたい。

6 まとめと今後の課題

今回ベンハムのコマについて調べてみて多くのことが分かった。

ベンハムのコマを回転させたときに見える色は、

- 白と黒の模様の配置によることで変化すること
- コマの黒ベタの部分が、色が見えることについて重要な役割をしていること
- 回転速度によっても色が変換すること
- 模様の長さを変えると、明度が変化するらしいこと
- コマの回転方向を変えると、色の見え方が反転すること

などである。分かったことも多かったが、逆に疑問も増え、ベンハムのコマについてもっと調べてみたいと思うようになった。

色の判別には、日本色彩研究所監修の配色カードを使用したけど、色の明度や彩度を細かく比較することができなかった。そこで、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。「マンセル表色系の色立体」などを使って、細かい色の違いを厳密に調べてみたい。

色が見えるのは、白と黒のパターンや、回転数の違いによることがわかったが、何故色がついて見えるのかはわからなかった。特に、回転を逆にすると、色の並びが反転する現象は、理解に苦しみ疑問がさらに増えてしまった。このことについても、調査方を考えて挑戦してみたい。

また、色が見えるのは「錯覚」によるものなのかを詳しくしらべ、本当に写真を撮ることはできないのかを検証していきたい。さらに、光源の色の違いによる見え方の違いについても調べていきたい。

7 参考資料

- ベンハムの独楽 (Wikipedia)
- ベンハムのこまー実験と考察 (<http://www2.tokai.or.jp/seed/seed/minna7.htm>)
みんなの実験室7 横山玲子
- Benham's Disk (<http://faculty.washington.edu/chudler/benham.html>)
University of Washington Eric H. Chudler, Ph.D.