

連載：ベンハムのコマ

西山 豊

2022年9月14日 更新

連載：ベンハムのコマ (1)

「ベンハムのコマ」は調べることの楽しさを教えてくれるテーマだった。答らしきものに到達するのに約1年かかったが、記事を書いた当時を思い起こしながら、数回にわけて紹介していきます。

1979年、私は民間企業に勤めていた。

会社から帰宅すると、妻が「テレビの『一休さん』の番組で、面白いコマが紹介されていた」という。

「白黒の模様をしているが、コマを回すと色が浮かび上がる」というのだ。

当時のテレビはアナログ時代で、録画装置もナショナルからマックロードが発売されているが高額だった。番組の再放送もない。妻の話聞いてみた。

姫の誕生祝いとして、将軍はコマを贈りたいと言い出した。コマ作りの名人たちに作らせたコマは、どれも極彩色で絢爛豪華なものだった。一休さんが持ってきたコマは墨で描いたみすばらしいものだった。

「これ一休、そちのコマはどこがすばらしいか言うてみい」

「はい、将軍さま、一度こちらのコマを回してみてください」

名人たちの作ったコマは模様も色も消えてしまい、一休さんが作ったコマは美しい色が浮かび上がるのだった。

妻の話を知りただけで、私は半信半疑だった。

このコマは「ベンハムのコマ」という名前で、1894年、イギリスで流行したおもちゃで、科学雑誌『ネイチャー』で議論されていることも知らなかった。(つづく)

連載：ベンハムのコマ (2)

「白黒で色が出るコマ」

私は日常の疑問を手帳にメモすることにしてた。

すでに「扇風機はなぜ逆に回って見えるのか」「1階でも2階でも点滅できる階段のスイッチはどうなっているのか」等の疑問は解決していた。今回の疑問は物になるかどうかはわからなかった。

家から会社までの通勤は約1時間で、満員電車だった。

新聞を広げることもしない。今のようにスマホもゲームもない、英会話や中国語会話のカセットを聴いている人がいた。私は日常の疑問をあれやこれや空想することにしてた。満員電車や雑踏の中は精神を集中するのに適している。満員電車が大きく揺れて、中国語のカセットを聴いていた人のイヤホンが外れて車内に中国語が流れるというハプニングもあった。のどかな昭和の時代だ。

「白黒で色が出るコマ」

いったいどこから調べる？ どうして調べる？ 自問自答が続く。

私の学生時代は大学紛争で、講義がほとんど潰れた。でも1回生の1967年は、まだ講義も試験もあった。教養部の講義に心理学があり、その教科書に知覚判断や錯視のことが書いてあったのを思い出した。載っているとしたら、あのあたりだろう。でもその本は滋賀の実家にある。近隣の図書館に行ってみることだと考えた。

会社の就業時間は9時から17時36分までだった。週38時間労働で、週6日制から週5日制へ機械的に割り振るところなる。いかにもコンピュータ会社らしい。17時36分の終業時刻のチャイムになると私はさっさと帰宅する。

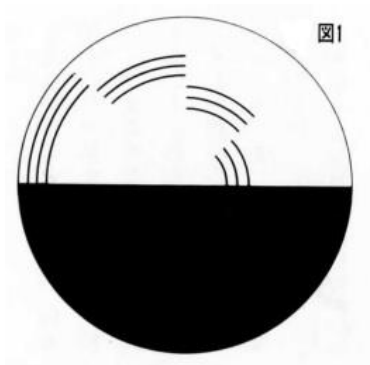
会社は大阪市内にあったので、帰宅するまでに紀伊國屋や旭屋の大書店に立ち寄ることができた。図書館へ行く手間が省けた。心理学関係の専門書を数冊ながめる。色が出るコマとして「ベンハムのコマ」の説明があった。図が掲載されているものもあった。これだ！と思った。私は手帳に概略をメモした。また、巻末に参考文献が記載されていたので、これもメモした。この論文は調査研究に役立った。

Jozef Cohen and Donald A. Gordon, The Prevost-Fechner-Benham Subjective Colors, Psychological Bulletin, Vol. 46, (1949).

帰宅して夕食後、ベンハムのコマを作図してみた。円の下半分が真っ黒、上半分が3本ずつの円弧が半径をずらして45度おきに描いてある。単純な図形でコンパスと定規で作図出来た。

これが「ベンハムのコマ」というのか！

さて、これをどう回す？ (つづく)



連載：ベンハムのコマ (3)

ベンハムの白黒のパターンは作図できた。でも回すコマがない。

回転するものとして家にはレコード・プレイヤーと扇風機があるが、レコード・プレイヤーでは遅すぎるし、扇風機では速すぎる。それに、目的外に使用すると機器をいためてしまう。やはりコマが必要だ。あす会社からの帰りに玩具店に寄ってみようと考えた。

玩具店でコマは売っていないかと聞く。コマは季節もので正月にはよく出る。でも直径 10 センチのパターンを乗せるような大きなコマはない。民芸品店なら売っているかもしれないとのことだった。

早くベンハムのコマを回してみたい。でもコマがない。思案しているところ、妻が木工店に聞いてみたらとのこと。木工店に聞いてみると、普段は農作業用の工具を作っているがコマも作れるということだった。コマの大きさを伝え安定性のいいものを 5 個注文した。

一週間ほどしてコマができあがってきた。固くて重い材質で軸がぶれない安定性のいいコマだった。

さっそく回してみる。一休さんの番組にあった通り色が浮かび上がってきた。白黒の模様だから回転すれば灰色の中間色になるだろうと想像していたが、れっきとした色である。

コマを右に回す（時計回り）と、外から青、緑、だいたい、赤の順に見える。この順は虹と同じく波長の順に並んでいる。

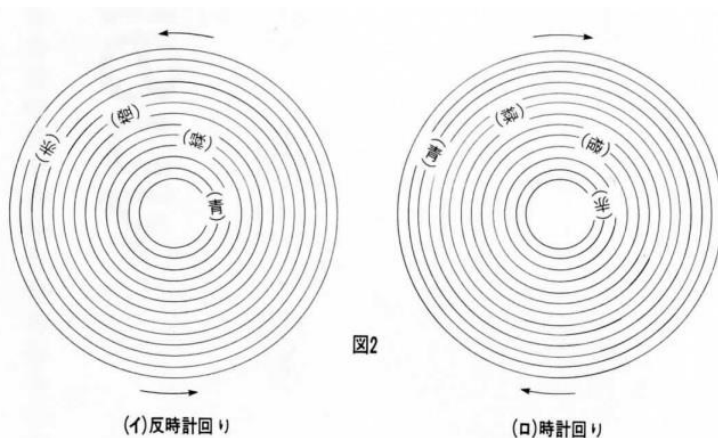
また、左に回す（反時計回り）と、外から赤、だいたい、緑、青の順になる。色の順が逆になるのは想像がつく。

扇風機が逆に回って見えるのは蛍光灯の下でしか観察できなかったが、ベンハムのコマは室内でも室外でもどこでも色が浮かび上がってくる。

1979 年に受けたこの感動、今でもよみがえってくる。

白黒のパターンでなぜ色が出るのか？

私の「好奇心と探求」は（つづく）



連載：ベンハムのコマ（4）

ベンハムのコマをデジカメで動画撮影したものです。

右回転（時計回り）すると、外側が青黒く、中心が赤黒く、その中間がだいたい、うす緑が見えると、主観色 (Subjective Colours) を体験したことになります。肉眼ではもっと鮮明に色を感じるのですが、デジタル処理をすると3割ほど色度が落ちます。

静止画は白黒または灰色の画像がぶれた状態で写り、色はどこにもありません。

1979年、私は、この感激を多くの人に伝えようとしたのですが、ほとんど伝わりませんでした。IT技術が進化したので、説明しやすくなりました。

ヒトはどの段階で色を認識するようになるのか、これについての私の仮説を最後のところ（少し先です）で説明します。（つづく）

ベンハムのコマ（動画）

<https://www.youtube.com/watch?v=MQRmtQeN0r0>



連載：ベンハムのコマ (5)

主観色（しゅかんしょく）とは、無彩色だけの場合でも、特定の条件で有彩色を知覚する現象。現象を指すものであり、特定の色を指す言葉ではない（Wikipedia）。

英語の Subjective colors を和訳したものである。

主観色研究の原典ともいえるべき、次の論文を読んでおく必要があった。

Cohen, J., & Gordon, D. A. (1949). The Prevost-Fechner-Benham subjective colors. Psychological Bulletin, 46(2), 97-136.

私が調査した 1979 年当時は、図書館の相互利用もなく、インターネットも普及せず、論文を所蔵する図書館で複写を依頼するしかなかった。心理学科があり、この雑誌を創刊号から所蔵している国内の図書館は限られる。私は京大文学部の図書館に出向き、理由を述べて論文複写してもらった。40 頁に及ぶ論文だった。

主観色を最初に発見したのはフランスの修道士プレボーである（1826 年）。

その後、ドイツの物理学者フェヒナーによって色のでる円盤が考案される（1838 年）。

ヘルムホルツなど様々な学者が色のでる円盤を発表している。

イギリスのベンハムが色のでるコマとして玩具を販売し、大流行になる（1894 年）。この玩具をめぐるケンブリッジでは論争があり、そのことが科学雑誌ネイチャーにも記載されている。

プレボー、フェヒナー、ベンハムと西洋では主観色の研究は長い歴史があるのに、日本ではほとんど取り上げられないことに不思議を感じる。

私は、冒頭の論文の図から、いくつかのパターンを模写して色が出るかを実験してみた（当時）。フェヒナーのものは色を感じなかった。ヘルムホルツのものは、青と赤を鮮明に感じた。蛍光灯の下で見るとストロボ効果（扇風機が逆に回って見える現象）も同時に観察できるので、印象に残っている。色のでる円盤の中で、ベンハムのコマは秀逸である。だからイギリスで大流行したのだろう。

主観色がなぜ現れるのか、これについてははっきりわかっていない。（つづく）

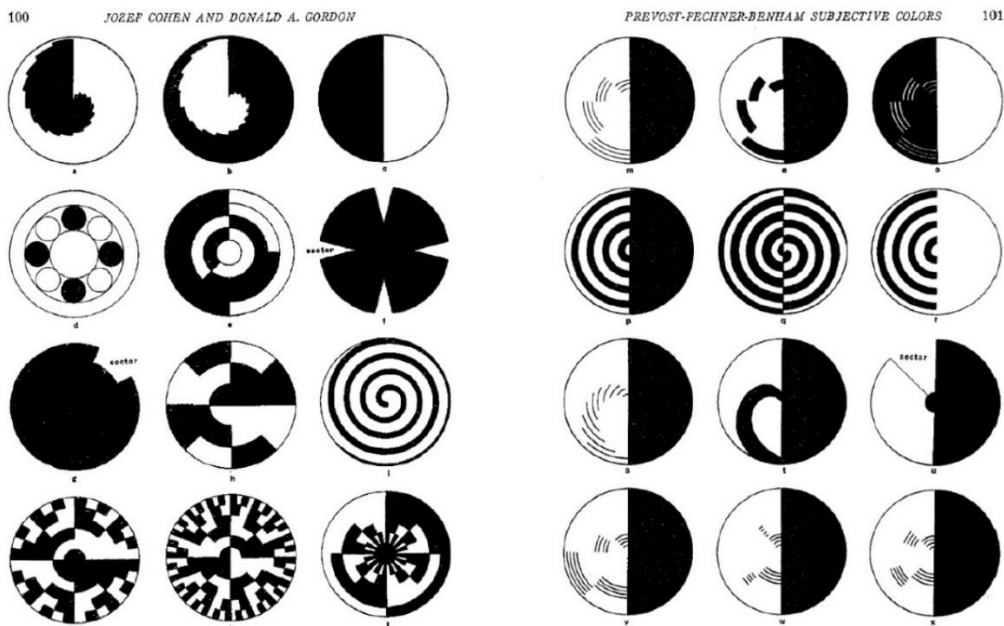


FIG. 1. DISKS FOR THE PRODUCTION OF THE SUBJECTIVE COLORS. Figs. 1a, 1b, 1c, Fechner; Fig. 1d, Dove; Fig. 1e, John Smith; Figs. 1f, 1g, Rood; Figs. 1h, 1i, Helmholtz; Figs. 1j, 1k, 1l, Brücke.

FIG. 1. (CONTINUED). DISKS FOR THE PRODUCTION OF THE SUBJECTIVE COLORS. Fig. 1m, Benham; Figs. 1n, 1o, Finck and Moore; Figs. 1p, 1q, 1r, Harst; Figs. 1s, 1t, Wolf; Fig. 1u, Bidwell; Figs. 1v, 1w, 1x, Bagley.

連載：ベンハムのコマ (6)

ここからは、白黒の模様からなぜ色が浮かび上がるかを考えてみよう。まず最初に、色とは何であるかをおさえておく必要がある。

色（いろ）は、可視光の組成の差によって感覚質の差が認められる視知覚である色知覚、および、色知覚を起こす刺激である色刺激を指す。色の認識には、光源・物体・視覚の三要素が必要である。(Wikipedia 色)

ここに赤色のバラがあったとしよう。

これは何色ですかと聞くと、赤色と答える。

では、なぜ赤色かときくと、赤色だからと答える。

真っ暗な部屋で見たら、それが赤色と言えますか、と聞くと、

その質問はインチキだと答える。

バラは赤を発光する力はなく、太陽光の赤色を反射しているだけだ。色の認識は、光、物体、人の三者が関係していることを如実に示している。光がなければ色は認識できない。では光とは何か。

光（ひかり）とは、狭義には電磁波のうち波長が 380 - 760 nm のもの（可視光）をいう。(Wikipedia 光)

物体には色がなく、太陽光の反射で色を感じている。

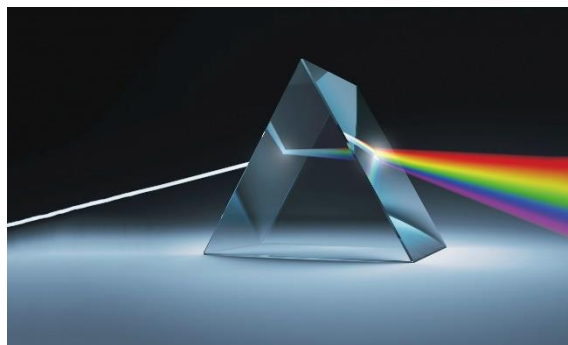
24色のクレパスは、白色と黒色は他の色と同様に対等でひとつの色であるが、白色はあらゆる色を含み、黒色はすべての色を含まない。加色混合と減色混合という説明がある。

葉っぱが緑色なのは、緑だけが反射され、それ以外の色がすべて葉に吸収されるからだ。光合成に必要なのは緑以外の赤や青の光のスペクトルが必要ということになる。

ニュートンは太陽光をプリズムで、屈折率により7色に分解した。これを写真で撮ることができる。一方、ベンハムのコマはヒトは認識できるが、この色を写真で撮ることができない。

ニュートンのプリズムは光の「静的な分解」とするなら、主観色は人間の視覚系・大脳が介在した「動的な分解」と考えられる。

では「動的な分解」とは何か。(つづく)



連載：ベンハムのコマ（7）

ベンハムのコマを作り直しましたので、新しい動画をアップします。

円盤は直径 10 センチで、右回転（時計回り）しています。太陽光の下で肉眼で、中心から外側に向かって赤、だいたい、緑、青の色がはっきり見えます。

動画はデジタル処理されているので、肉眼と比べて色の見え方が違い、鮮明度も 3 割ほど落ちますが、色が浮かび上がるのを確認していただければと思います。

画像の上段は 1979 年のもので、色あせ、コマの軸まわりが損傷しています。左はコンパスと定規、マジックペンで作成したもので、前回の動画はこれで録画しました。右は IBM の広報冊子 ACCESS に付録として掲載されたものです。

画像の下段は 2022 年に作成したもので、MS-WORD の図形描画で作成しました。左はベンハムのコマです。これを回すと中心が赤黒く、周辺が青黒くなるので、それを改良しました。円弧と下半分の黒との間に空白を入れて角度をずらしました。今回の動画は下段右で録画しました。

ベンハムのコマの下半分の黒は色に関係しません。目を休める、リセットする部分です。

上半分の円弧は角度が関係していることに気づくはずです。

回転方向でみると、3 本ずつの円弧の前後に白色部分があります。この部分が光を反射しますので、連続する 2 つの光の干渉と考えると、特定の色だけが浮かび上がってきます。これについては後述します。（つづく）

Benham's top（動画）

<https://www.youtube.com/watch?v=W74nLa0uhfk>



連載：ベンハムのコマ (8)

1979 年、ベンハムのコマは何故色が出るのかを考えていた。約 1 年かけておおよその推論ができたので、レポートにまとめた。これをどこに発表するかを考えた。知覚判断を扱っているのは日本心理学会であり、その雑誌に投稿しようと考えて手紙を書いた。すると、この雑誌は日本心理学会の会員しか投稿できない。その学会員になるには、現学会員の推薦がいるということだった。私は当時、民間企業に勤めていたので、学術の世界はこういうものかと思い知らされた。

そこで、私の「鉛筆考」を掲載してくれた『無限大』（日本 IBM 広報誌）の編集部に手紙を出したところ、面白い記事だから載せましょうということになった。おまけに IBM 広報冊子『ACCESS』の年末年始号にも、ベンハムのコマを付録にしようと言ってくれました。

私が、これまで FB に連載投稿してきた内容は、つぎの記事に基づいています。

「ベンハムのコマ」『無限大』日本 IBM 広報誌、1979 年 10 月・12 月号、No. 46, 45-50

（『サイエンスの香り』日本評論社、1991 年に所収）

<http://yutaka-nishiyama.sakura.ne.jp/ibm/mugen7910.pdf>

「数学を楽しむ／ベンハムのコマ」『理系への数学』2008 年 5 月、Vol. 41, No. 5, 4-7

<http://yutaka-nishiyama.sakura.ne.jp/riken/riken0805.pdf>

Yutaka Nishiyama, The Mathematics of Benham's Top, Int. J. of Pure and Appl. Math., Vol. 93, No. 3, 399-408, 2014.

<http://www.ijpam.eu/contents/2014-93-3/10/10.pdf>

全体の 8 割ほどは紹介しましたが、一番肝心なところ、どこでヒトが色を認識するのか、私の仮説（光の第一次刺激と第二次刺激の干渉について）は、後に詳しく述べます。（つづく）

連載：ベンハムのコマ (9)

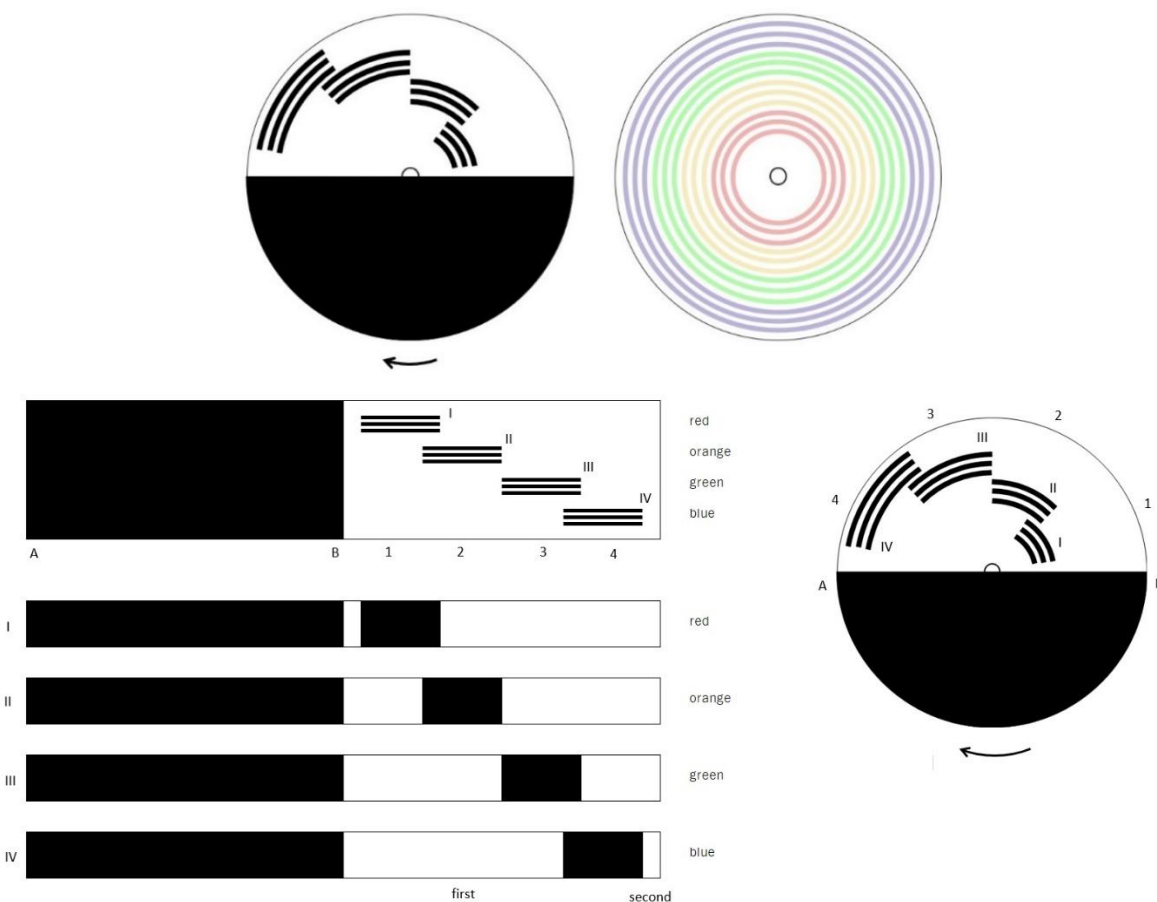
ベンハムのコマを右回転（時計回り）しますと、中心から外に向かって、赤、だいたい、緑、黒っぽい青が肉眼で確認できます。画像は私が見たイメージです。動画では、鮮明度が3割ほど落ちます。白黒から色が浮かび上がるだけでなく、色の順序が虹と同じく波長の順に並んでいることに、私は注目しました。

左回転（反時計回り）すると、色の順序が逆になることは、容易に理解できます。ベンハムのコマは角度に注目すると、回転軸に対して対称図形になっているからです。

コマが回転する角度を横軸にとると、赤、だいたい、緑、青が出る I から IV のケースは、連続する2つの白色光が関係していることがわかります。

円盤の下半分の黒は目を休めるためのもので、色には関係しません。上半分の3本ずつの円弧はどれも、白-黒-白の順番になっていて、白の長さや比率が違います。最初の白を第一次刺激、二番目の白を第二次刺激とするなら、この2つが何らかの干渉（強調、打消しなど）を起こして、特定の色が浮かび上がることになっているのではと考えられます。

ではなぜ干渉が起こるのか。それは2つの白を挟む黒が関係しているように思います。黒は第一次刺激を遅らせる働きをしています。そして、この黒は4つのケースとも同じ長さ（角度が45度）です。これも関係してそうです。私の仮説は既論文にも発表していますが、もうすこしわかりやすく説明していきます。（つづく）



連載：ベンハムのコマ (10)

2005年、私はイギリスのケンブリッジ大学に留学する機会がありました。57歳の時でした。数理科学センターに客員研究員として申請しましたが、業績が評価され客員教授として、スティーヴン・ホーキング博士の研究室に配属されました。

大学附属図書館は科学雑誌『ネイチャー』が創刊号からそろっていて、自由に閲覧できるという恵まれた環境でした。

<https://www.lib.cam.ac.uk/>

いくつかの研究テーマの中で、ベンハムのコマについても関心がありました。1894年にベンハムのコマがイギリスで流行し、このコマをめぐる論争があり『ネイチャー』にも掲載されていたというのを知っていたので、この目で確かめてきました（頁の右下）。

The Artificial Spectrum Top by Charles Benham, 1894.

コマの色が出る、出ないと行って大人が真面目に議論しているなんて、今の日本では考えられません。基礎科学とはそういうものですが、イギリスの研究環境が羨ましく思いました。

私は、1979年に「ベンハムのコマ」を『無限大』に発表しましたが、主観色の研究がどこまで進んでいるのか関心がありました。1995年にベンハムのコマから100年という記事が発表されましたが、理論はそれほど進んでいないようです。

100 years of Benham's top in colour science, 1995.

白一黒一白のパターンで、連続する2つの光刺激の干渉で特定の色が浮かび上がるという私の仮説と検証を、43年ぶりに再開してみようかと思っています。（つづく）



200

NATURE

[DECEMBER 27, 1894

the case of the Chinese, for they still use the name "hand-pattern" for the finger-print (see above). That this "hand-stamp" was in use in an ancient kingdom of Southern India, there is a proof in the Chinese records (9).

When we recognize that the hand-marks were early in use for identification by the three distinct nations, the Japanese, Chinese, and Indians, and when we consider that even the teeth-marks were so commonly used for authentication in India that the heir-apparent to As'oka Râjâ did not hesitate in plucking out his own eyes on recognizing the king's teeth-mark that accompanied the false epistle (10), it would seem quite true that among those ancient nations who were, with few exceptions, ignorant of the use of "written signature" method, it was but a natural process that the methods were invented to apply to identification some more or less unchanging members of human body.

Further, that the Chinese have paid minute attention to the finger furrows, is well attested by the classified illustrations given of them in the household "Tâ-tsâh-tsâ"—the "Great Miscellany" of magic and divination—with the end of foretelling the predestined and hence *unchanging* fortunes (11); and as the art of chiromancy is alluded to in a political essay written in the third century B.C. (12), we have reason to suppose that the Chinese in such early times had already *conceived*—if not perceived—the "for ever unchanging" furrows on the finger-tips.

Bibliography.—(1) "Keirin Manroku," 1800, new edition, 1891, p. 17. (2) Y. Hagino, "Nihon Rekishi Hyôrin," 1893, vol. vi, pp. 2, 24. (3) Same as (1). (4) Takizawa, "Genjô Hôgen," 1818, vol. ii, chap. xli. (5) Cf. Davis, "China," vol. ii, p. 162; Bazin, "Théâre Chinois," Introduction, p. li. (6) Shi-nai-ngân (?), "Shwai-hü-chuen," Kin's edition, Canton, 1883, tom. xii, p. 4. (7) *Ibid.*, tom. xxx, p. 18. (8) Cf. Terashima, "Wakan Sansai-zue," 1713, tom. xv, art. "Tegata." (9) Twan Ching-Shih, "Yü-yang Tsâh-tsu," ninth century A.D. tom. xiv. (10) Hien-tsang, "Si-yü-ki," sub. "Takhas'ila"; Hirata, "Indo-zôshi, MSS. vol. xxi, pp. 10-11, 26. (11) Terashima, *op. cit.* tom. vii, art. "Ninsômi." (12) "Kan-fei-tze," tom. xvii, sub. "Kwei-shi."

KUMAGUSU MINAKATA.
15 Blithfield Street, Kensington, W., December 18.

Peculiarities of Psychological Research.

THE following are a few of my grounds for questioning the scientific acumen of the psychical researchers:—(1) M. Riche's experiments are cited as if they were significant of telepathic action. On the contrary, they give odds of so little weight that they are significant of nothing but want of acumen. I have in card drawing, tossing and lottery experiments, all conducted with every precaution to secure a random distribution, obtained results against which the odds were more considerable. (2) Mr. Dixon is unable to see the importance of ascertaining whether there was an abnormal distribution in the cards cut or the cards guessed. His inability is a strong confirmation of my standpoint. (3) I have heard lectures, and read papers written by psychical researchers. Both alike seem to me akin to those products of circle squarers and paradoxers, with which, as a reviewer, I am painfully familiar. As a concrete example, I take my friend Dr. Oliver Lodge's psychical papers. They are typical, to my mind, of the manner in which the scientific acumen of even a professed and most highly competent man of science vanishes when he enters this field of "research."

I do not intend to take part in a controversy on the subject at the present time, but I do suggest that no better exercise could be found for a strictly logical mind, with plenty of leisure than a criticism of the products of the chief psychical researchers. Such a criticism would be of much social value, in the light of recent attempts to popularise the "results" reached by these investigators.
KARL PEARSON.
University College, London, W.C. December 19.

The Artificial Spectrum Top.
I HAVE read with interest Prof. Liveing's theory of my artificial spectrum top as summarised in NATURE of Dec. 13, p. 167, and am sorry I did not know of his conclusions before he made them public, because a very simple experiment would, I think, have convinced him of their inaccuracy. If Prof. Liveing, or any of your readers, will examine my top rotated in the light of a *bright* sodium flame, they will find that the colours are quite distinct. I know of no other way of seeing blue and red by the light of sodium, and the phenomenon, I think, shows decisively that the colours of the top are "artificial" sensations in the sense explained in my theory of the instrument.
DECEMBER 16. CHARLES E. BENHAM.

I HAVE examined Mr. Benham's top by the light of a bright sodium flame, but have failed to see anything like the colour

100 years of Benham's top in colour science

Christoph von Campenhausen, Jürgen Schramme
Institut für Zoologie III, Johannes Gutenberg Universität, 55099 Mainz, Germany
Received 22 June 1994, in revised form 7 December 1994

Abstract. For 100 years Benham's top has been a popular device demonstrating pattern-induced flicker colours (PIFCs). Results of early and recent investigations on PIFCs are reported and show that the phenomenon originates in phase-sensitive lateral interactions of modulated neural activity in the retina followed by additional spatial interactions in the visual cortex behind the locus of binocular fusion. Colour matches with normal colour stimuli indicate that S/(M+L) opponent neurons are involved. Dichromats do not find matching stimuli for all PIFCs. PIFCs may become useful in medical diagnosis. The phenomenon is interpreted as a side effect of a neural mechanism providing colour constancy under normal stimulus conditions.

連載：：ベンハムのコマ (11)

ベンハムのコマを光波の干渉で説明していきますが、「干渉」という言葉は別の意味で使われることのほうが多いです。ここでは3の物理学での干渉のことです。

1. 他人のことに立ち入って自分の意思に従わせようとする事。「他人の生活に-する」
 2. 国際法で、一国が他国の内政・外交に、その国の意思に反して介入すること。「武力-」
 3. 二つ以上の同じ種類の波が重なって、互いに強め合ったり弱め合ったりする現象。音波でのうなり、光波での干渉色によるシャボン玉の色づく現象など。
- 白-黒-白の連続するパターンで、2つの白（光波）がどのように干渉して特定の色が浮かび上がるかを考えていきます。（つづく）



連載：ベンハムのコマ (12)

Wikipedia 網膜より

<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%B6%B2%E8%86%9C>

眼球から大脳まで

(参考)

Wikipedia 目、網膜、錐体、視神経、脳

ヒトの眼は感覚器系に当たる眼球と附属器、神経系に当たる視神経と動眼神経からなる。眼球は光受容に関連する。角膜、瞳孔、水晶体などの構造は、光学的役割を果たす。網膜において光は神経信号に符号化される。視神経は、網膜からの神経情報を脳へと伝達する。

目に入った光は網膜の奥（眼球の壁側）の視細胞層に存在する光受容細胞である視細胞によって感受される。

視細胞には、明所で機能する錐体（cone）と、暗所で機能する杆体（または桿体）の2種類がある。

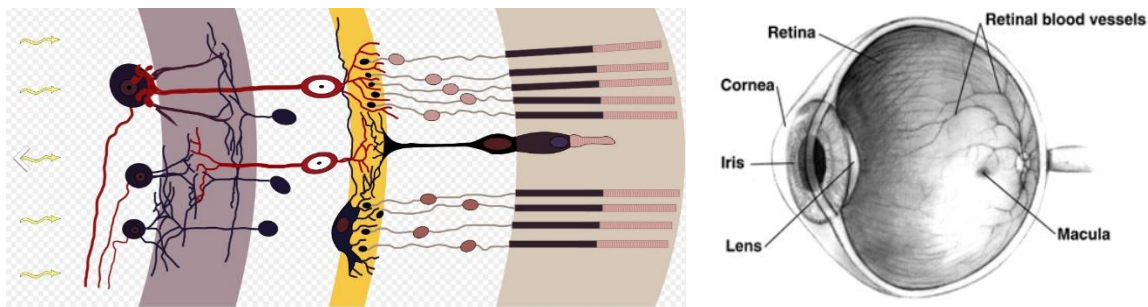
ヒトの錐体では、視物質として異なる蛋白質オプシンを持つ3種類の細胞がある。それぞれ吸収波長が異なっており、L錐体（赤錐体）、M錐体（緑錐体）、S錐体（青錐体）と呼ばれる。

L錐体は560nm付近、M錐体は530nm付近、S錐体は420nm付近の波長の光波を吸収する。

光波の干渉が起こるとすれば、錐体より前ということになるだろう。

(つづく)

図はWikipedia 網膜より、左が網膜表面。右に杆体細胞（棒状のもの）と錐体細胞（コーン状のもの）がある。



連載：ベンハムのコマ (13)

位相のずれによる波の干渉

波長と振幅が同じ2つの正弦波を考えます。ベンハムのコマの第1次刺激と第2次刺激に対応させます。

第1次刺激： $y_1 = \sin(x)$

第2次刺激： $y_2 = \sin(x+a)$

この2つの波の合成は位相のずれによって干渉を起こします。

数式で a が位相のずれです。

グラフでは第1次刺激が青色、第2次刺激が赤色、合成が灰色になっています。

位相差がないとき ($a=0$)、2つの波を重ねると (y_1+y_2)、振幅は2倍になります。

位相が90度ずれた場合は、最大振幅は1.4倍になります。

180度ずれた場合は、2つの波は打ち消しあい、振幅は0になります。

360度ずれた場合は、振幅は2倍になります。

(付記)

三角関数の和積の公式より

$$y_1 + y_2 = \sin(x) + \sin(x+a) = 2\cos(a/2)\sin(x+a/2)$$

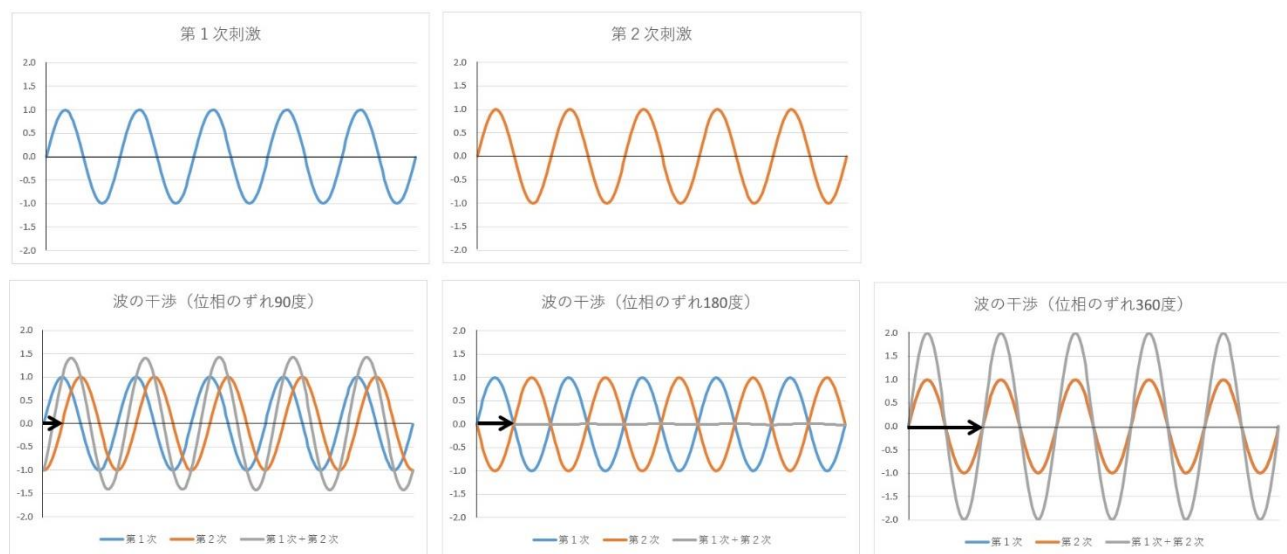
振幅は2倍になり、位相が $a/2$ ずれます。

ベンハムのコマで、

赤、緑、青の正弦波が、第1次刺激と第2次刺激に位相差がないときは、赤、緑、青を重ねると、振幅はそれぞれ2倍となり、合成色は白色になります。

赤の正弦波が位相が360度ずれることによって、振幅が2倍になったとしましょう。赤の位相差は同時に緑や青にも起こるので、重ね合わせにより緑や青は振幅が2倍にはならず、これらの色は薄くなるか消えます。

これが特定の色だけが浮かび上がる理由になっていると考えられます。(つづく)



連載：ベンハムのコマ（14）

太陽光の白色は、あらゆる波長の色を含んでいます。

いま、説明のために代表的な赤、緑、青の3色とします。

ヒトの網膜にある色を感じる視細胞で、3つの錐体の吸収波長は

L錐体（赤）560nm（ナノメートル）

M錐体（緑）530nm

S錐体（青）420nm

でした。

赤は波長が長く、青は短いです。モデルを単純にして、一定区間に波数が4個、5個、6個の波を赤、緑、青に対応させます。

色が浮かび上がるのは、光の第1次刺激（最初の白）と第2次刺激（後続する白）の位相のずれによる干渉として考えます。

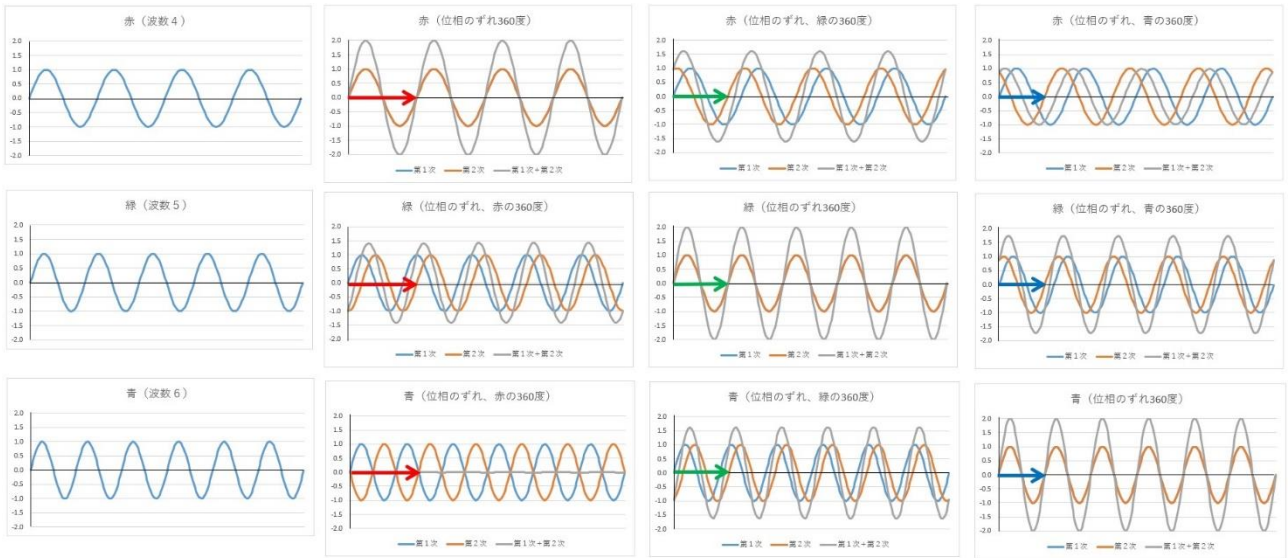
赤（波数4）の位相が360度遅れて第2次刺激に重なったとします。赤は重なりにより振幅は2倍になります。緑（波数5）は振幅が1.4倍になり、青（波数6）は互いに打ち消しあって振幅はゼロになります。つまり、赤が浮かび上がることになります。

同様に、緑（波数5）の位相が360度遅れて第2次刺激に重なったとします。緑は重なりにより振幅は2倍になります。赤（波数4）は振幅が1.6倍に、青（波数6）は振幅が1.6倍になり、緑が浮かび上がることになります。

青（波数6）の位相が360度遅れて第2次刺激に重なったとします。青は重なりにより振幅は2倍になります。赤（波数4）は振幅が1倍に、緑（波数5）は振幅が1.7倍になり、青が浮かび上がることになります。

太陽光の白色はあらゆる波長の色を含んでいます。白—黒—白のモデルで、第1次刺激と第2次刺激の間に位相のずれが生じたとき、ある色の位相が360度ずれたとき、その色だけが干渉によって浮かび上がることになります。

ベンハムのコマとの関係ではどうなっているかを考えていきます。（つづく）



連載：ベンハムのコマ（15）

ベンハムのコマは色が出るだけでなく、ニュートンのプリズムのように赤から青まで波長の順に並んでいることが、私はとても不思議だった。1979年に記事を書いたときは、第1次刺激と第2次刺激の干渉でおこるのだろう、第1次刺激の長さが関係しているのだろうとぼんやり想像できたが、43年後のいま再考してみると、この予想はほぼ当たっていることがわかった。

以前に示した図で、コマが右回転（時計回り）しているとき、中心から外に向かって赤、だいたい、緑、青の順に色が並んでいた。波長が長いほうから短いほうだ。直線モデルにすると、上から赤、だいたい、緑、青の順である。

コマの下半円の黒は、目を休めるためにあり、色の発現とは関係しない。上半円の白—黒—白が色に関係している。直線モデルでは左から右に進むと考え、左半分の黒は色と関係せず、右半分の白—黒—白が色と関係する。

先頭の白を第1次刺激、黒をはさんで後続する白を第2次刺激とする。真ん中の黒は第1次刺激の伝達を遅らせる働きをするのではないだろうか。遅れた第1次刺激が第2次刺激と重なるとき、何らかの干渉（強めあい、打ち消しあい）を起こすのではないかと考えた。

第1次刺激の白が短いときは大きく遅れ、長いときは小さく遅れるなら、赤、だいたい、緑、青の順に並ぶという説明に都合がいい。

そこで、私は大胆な仮説を立てた。

第1次刺激の白（の長さ）を質量 m (m_1, m_2, m_3, m_4)、

加速度を a (a_1, a_2, a_3, a_4)、

伝達を遅らせる黒（の長さ）を F （一定）

とすると、これらには

$$F=ma$$

の運動方程式が成り立つ。

図より、質量は、

$$m_1 < m_2 < m_3 < m_4$$

となる。

運動方程式 $F=ma$ より、加速度は、

$$a_1 > a_2 > a_3 > a_4$$

となる。

「軽いものほど動かしやすく、重いものほど動かしにくい」ということだ。

加速度 a が大きいと、第1次刺激は大きくずれ、第2次刺激と重なる。赤の波長は長いので、赤の干渉（強めあい）が起こり、赤が発現する。

加速度 a が小さいと、第1次刺激は小さくずれ、第2次刺激と重なる。青の波長は短いので、青の干渉（強めあい）が起こり、青が発現する。

第1次刺激の白の長さや波長の長さは逆の関係になる。

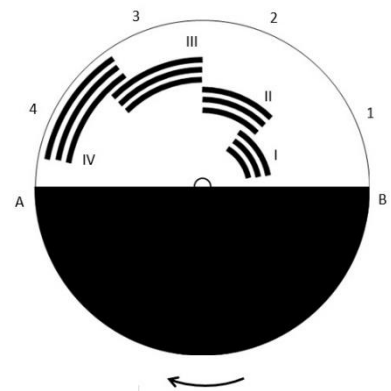
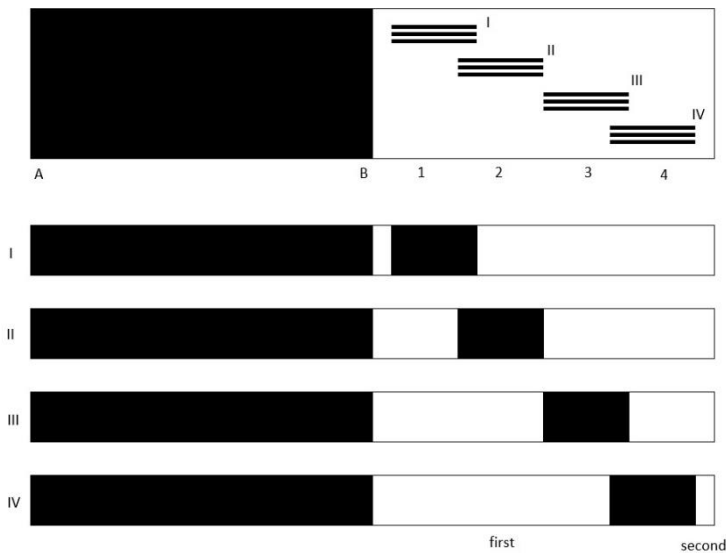
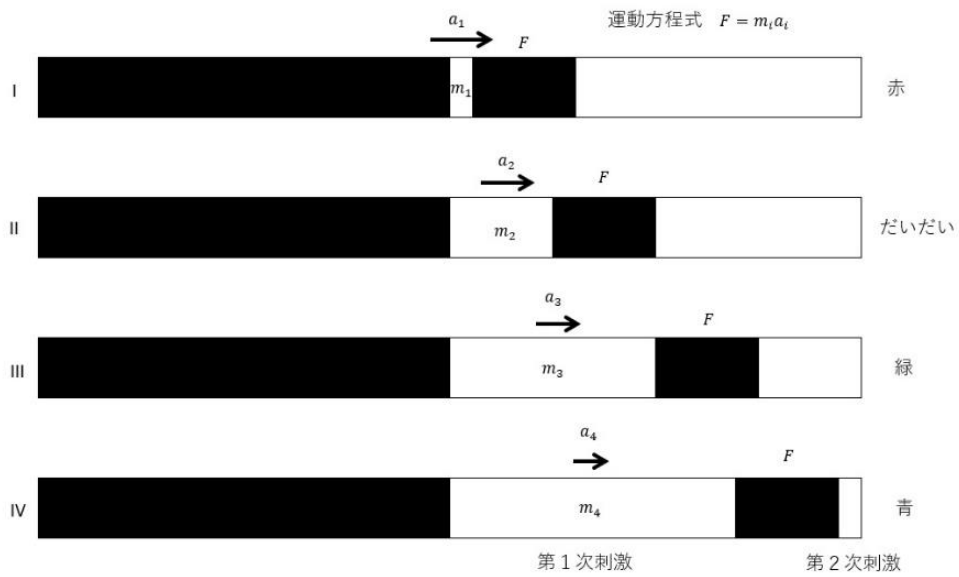
白の短い順に波長の長い順に色が並ぶ。

赤、だいだい、緑、青

ニュートンのプリズムは白色光を赤から紫まで分解した。ベンハムのコマはヒトの視覚系により白色光を赤から青まで分解する。

ニュートンのプリズムは「屈折」による静的な分解とするなら、ベンハムのコマは「干渉」による動的な分解ということになる。

(つづく)



連載：ベンハムのコマ（16）

コマをお持ちでない方へ

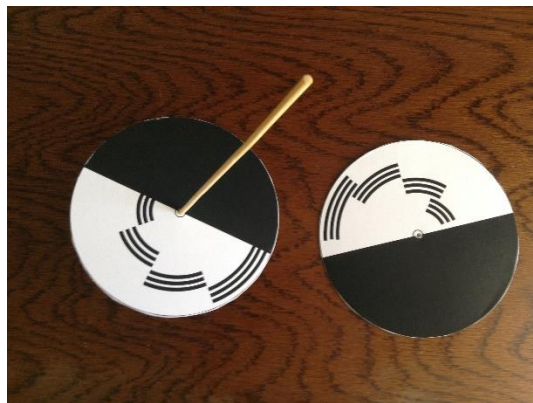
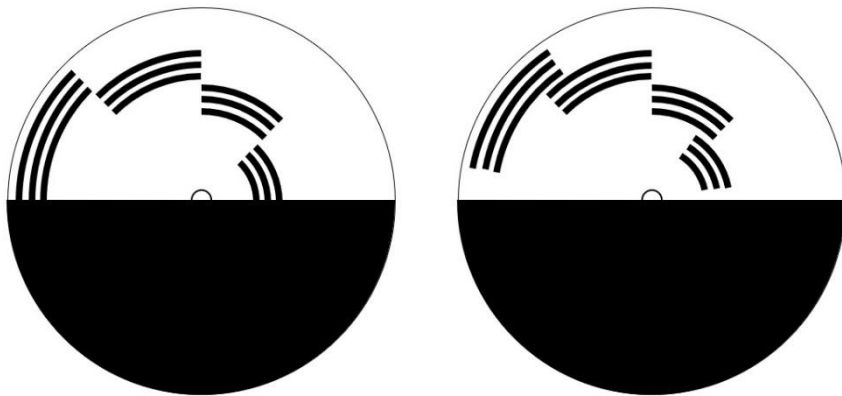
コマのパターン（直径10センチ）を印刷し、厚紙に貼りつけ、中心に竹ひご（料理用の竹串で可能）を刺せば、回転させることができます。机の上で回せないときは、左手の指でコマを支え、右手の指で回すことができます。

手回しゴマはネットで安価に入手できます。

動画では不鮮明だった色（赤、だいだい、黄、緑、青、紫など）が確認できます。

いちど主観色を体験してください。

（つづく）



連載：ベンハムのコマ (17)

ベンハムのコマを単純化すれば、図のように黒-白-黒-白の領域があり、左から右に進み、これが繰り返される。

第1次刺激と第2次刺激による感覚のずれが、特定の波長と一致するとき、白色波の干渉により、その色だけが浮かび上がる。

ベンハムのコマに限らず主観色の原因は、断続する光の刺激の問題に還元される。

光刺激がヒトの感覚として伝わるには、閾値や遅れが関係する。

これも関係しているだろう。

黒-白-黒-白の長さ (a, b, c, d) を変化させ、コマの回転速度を調節することで、あらゆる色を作り出すことができる。実験装置ができ、私の仮説が実証されれば、プレボー (1826)、フェフィナー (1838)、ベンハム (1894) からつづく主観色の歴史について、決着がつくのではと思う。

連載はここでいったん閉じます。

ご視聴、ありがとうございました。

主観色の発現モデル

