The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	主観色の発生機構に関する実験心理学的諸研究の検討
Author(s)	中島, 義明; 川村, 智
Citation	大阪大学人間科学部紀要. 1996, 22, p. 1-20
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/4175
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

主観色の発生機構に関する実験心理学的諸研究の検討

中島義明・川村　智

目　次

1．問題の生起
2．ベンハムのコマ
3．ベンハムのコマの現象特性
4．運動要因
5．主観色の生起機序に関する諸見解
6．静止刺激による主観色
7．ラインの意義
8．主観色の生起する神経レベル
9．なぜ色が生じるか

主観色の発生機構に関する実験心理学的諸研究の検討

中島義明・川村　智

1．問題の生起

無彩色の刺激によって色の感覚を生じさせる現象があり、主観色といわれている。この現象の発見は古い。Prevost(1823-26) は、暗室の中で白い紙を振ってそこに当たる大陽光線が遮断される様子を観察していたところ、白色が断続して見えるだけでなく、様々な色が見えた、と報告している。また、Fechner(1838) は、半径毎に白黒の面積比の異なる円盤を回転させて様々な輝度の灰色を作り出そうとしていたとき、灰色に融合するよりも遅い回転では、回転速度と半径とに応じて様々な色が生み出されることを発見した。

このように、白色光が断続的に提示されたり、白黒図形が回転したり（図形によっては回転なしでも）するときに色感覚が生じる現象は、Fechner(1838) 以降にも多くの人々によって独立に発見されている（Brewster, 1861 ; Smith, F. J., 1881 ; Hannay, 1881-82 ; Stewart, G. N., 1878-88 ; Benham, 1894 ; Ives, H. E., 1917, 1918 ; Klopsteg, 1931 ; Way, 1932 ; Skinner, 1932)。無彩色の刺激の中に有彩色の色が見えるこの種の現象は、今日においては、刺激の物理的性質からは説明できないことは明らかであり、ある種の無彩色の刺激が、人間の色覚機構に色刺激を与えるのと同様の反応を引き起こすために生じていると考えられている。色覚系のメカニズムを考える上で興味深い現象である。

2．ベンハムのコマ

白黒の円盤を回転させると色が現れる、ということが知られて以来、多くの研究者により、数十種にも及ぶ円盤が考案された。そのなかでもBenham(1894) が発表した「ベンハムのコマ（以下、コマ)」と呼ばれる図１の円盤は、色の現れのドラマチックさにおいて卓抜しており、主観色の研究は以降、この円盤についての観察を中心に行われるようになった。

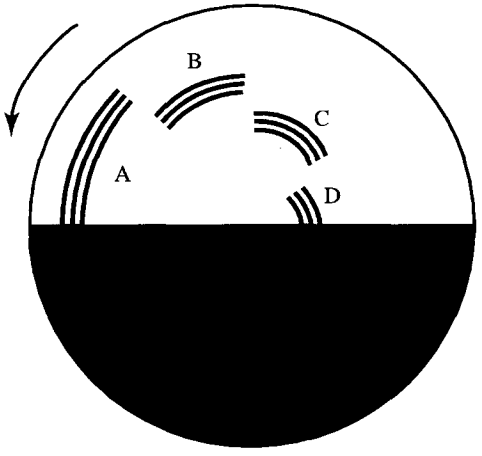

図1【ベンハムのコマ（Benham, 1894)】
矢印の方向に適当な速度で回転させると、A、B、C、Dのラインの部分にそれぞれ赤、黄、緑、青が見える。

3．ベンハムのコマの現象特性

Bagley(1902)、Doniselli(1907)、Pieron(1922, 1923)、Hasegawa(1971) らによる組織的観察をまとめると以下のような現象特性が指摘される。ただし、Doniselliは、実験に図2に示すような、コマを中心から展開した長方形の図形を回転ドラムに巻き付けたもの（以下、ドラム）を用いている。このような刺激を用いると、コマにおける中心部と周辺部との回転速度の相違による条件差が避けられる。

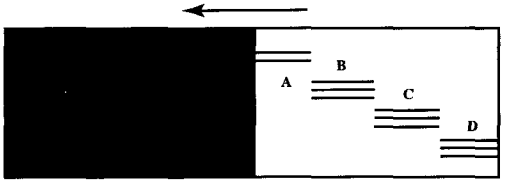

図2【図1のベンハムのコマを展開した図形】
この図形をドラムに巻いて回転させると、網膜上の各点にベンハムのコマを回転させたときと同じ変化パターンが与えられる。これにより、ベンハムのコマにおける、中心部と周辺部の回転速度の違いを除去することができる。

3.1　ラインの位置・ラインの長さ・照明強度・回転速度等

以上のコマまたはドラムを、適当な照明強度・回転速度のもとで図の矢印の方向に回転させると、図中にA、B、C、Dと記されたライン（弧）の通過部分がそれぞれ赤、黄、緑、青に見

える。他の条件が一定なら、ラインの前後の（特にラインの前の）白セクターの持続時間によって見える色が決定される。それゆえ、回転を逆にすると、現れる色の並びが逆転する。すなわちA、B、C、Dに見えていた色が、回転を逆にすると、それぞれD、C、B、Aに見えるようになる。また、ラインの長さが白色部分の横長の1／4（コマにおいてはラインの中心角が45°）であるときに見える色の飽和度が高い。

回転速度を増すと、ラインに見える色がそれぞれ長波長側に移行し、逆に速度を減ずると色が短波長側に移行する。飽和度の高い色が見えるのは4.8rps～10rpsであり、3rps以下では色が現れず、30rps以上では全体が灰色に融合する。又、照明強度が強くなると長波長側に移行し、弱くなると短波長側に移行する。回転速度を増して同時に照明を弱めるか、あるいはその逆に速度を減じて照明を強めると、見える色が一定に保たれる。

3.2　ラインの太さの影響

円盤中に描かれてあるラインの太さと色の見えの関係については、ラインが細すぎては色は見えない（Pieron, 1922, 1923）が、太くなるほど色の飽和度が落ち（Pieron, 1922, 1923；Bagley, 1902）、もっと太くなるとラインの縁にのみ色が現れ、ラインの内部には色がでない（Pieron, 1922, 1923；Finnegan & Moore, 1895；原井ら, 1961）という結果が得られている。研究によってあるいは被験者により異なるが、視距離50cmに対し、おおむね数ミリの幅のラインが飽和度の高い色を生じさせ、1cmを越えるとラインの中央部には色が現れない。

3.3　白色以外の刺激による実験

白色光以外の照明を用いる（Rood, 1860；Abney, 1894；Gebhard, 1943）か、または図形自体の白色部分を他の色に置き換えて（Bagley, 1902）も、刺激に含まれる色以外の色が見える。とくに刺激に含まれる色の補色は現れやすい。単色光を用いても同様である。

3.4　分光組成の異なる2照明による実験

等色に見える白色照明でも、その分光組成が異なると異なった主観色が現れる。とくに分光的に優勢な色とその補色が現れやすい（Abney, 1894；Pieron, 1922）。

4．運動要因

主観色をもたらすための刺激としては、多くの場合、回転図形が利用されている。はたして、主観色を生じさせるのに、刺激に図形の回転のような運動要因が含まれていることが必要なのだろうか。

Jarvis(1977) は、コマを用いる刺激事態から、運動要因のみを排除した条件をつくり、主観色の生起に運動要因が必要でないことを直接的に検証した。図3に示すように、コマの各ラ

イン、及びその隣接領域から与えられる輝度変化のパターンの組合わせに相当するものを、それぞれ円形小領域（Target）とその周囲（Surround）に提示したところ、円形領域に、コマの各ラインに現れる色にほぼ一致する色が観察された。

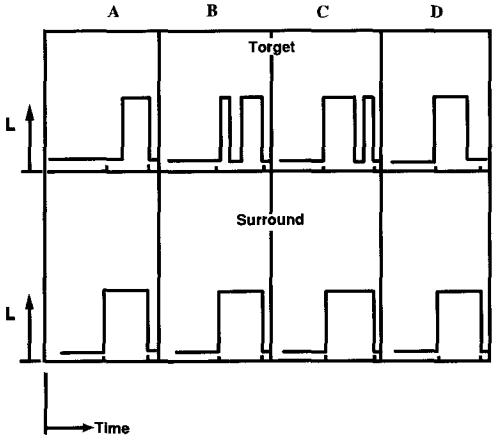

図３【ベンハムのコマから与えられる輝度パターン】
上段のような波形の光を円形領域に、下段のような波形の光をその周囲に呈示するとそれぞれコマまたはドラムのラインとその周囲から与えられる輝度パターンに相当する刺激が得られる。

川村（1991）は、図２を回転方向に沿って４分の１に縮小しそれを同方向に４個つなげた図４の図形を用い、これを図２に対して４分の１の速度で回転させ、両刺激についての色の見え方を比較した。このとき刺激上の任意の点における白・黒の明滅パターンは、両者で同一であり、唯一の違いは、各点を図形が通過する速度が１：４になっていることである。結果は、両者でほぼ一致するものであった。これは、黒・白の明滅パターンさえ同一であれば、見える色は運動の速度に依存しないことを示している。

以上より主観色は、明滅パターンの異なる少なくとも２つの局面が空間的に隣接する刺激事態において生じるが、回転などの運動はこの条件を満たすための一例に過ぎない、と考えられる。

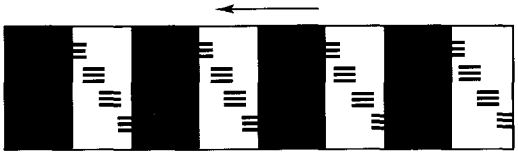

図４【図２を水平方向に1／4に縮小し、それを同じ方向に４個つなげたもの】
この図形をドラムに巻いて図２の図形の1／4の速度で回転させると、網膜上の各点おける変化パターンを変えずに、各々の図形要素が進行方向の隣接点に移動する時間のみを１／4にすることができる

5．主観色の生起機序に関する諸見解

これまでに提起された主観色の生起機序に関する諸見解を振り返る。

5.1　中枢か末梢か

主観色を生じさせることに関係する部位が、中枢過程であるか、末梢過程であるか、という問題に関しては、単眼視順応によって主観色が見えるようになった後に、もう一方の目で見ても見えないこと（Exner, S., 1870)、刺激の図形要素を分離して左右両眼から提示し融合視させると主観色がみえないこと（Hess, 1952；Gregory, 1968）などから、末梢、少なくとも両眼が融合される前の過程におけるものであるといえるだろう。

等色であっても分光組成の異なる照明のもとで観察したときに異なった主観色が現れることがある事実もまた、主観色が末梢に深く関わるものであることを示唆している。分光組成が異なっても等色に感じられるのは、中枢の最終段階においては等しい神経活動が生じていることを意味する。したがって、もし主観色が中枢において生じているなら等色からは同じ色が感覚されるはずである。それゆえ上の事実は、たとえ等色といえども末梢レベルの視覚系には異なった反応をもたらすことを示すとともに、それ以前の過程で主観色の原因が生じていることを示唆している。

主観色の見えに個人差が大きいことから中枢の関与を指摘するものもある（Knehr, 1953）が、上記の事実から考えて、中枢にかかわるとしても二次的なもので、本質的な生起原因は末梢にあると考えられる。

5.2　感覚時間・残効時間説

これは、光が眼に届いてからの受容体の興奮の立ち上がり曲線や、光が途切れてからの興奮の立ち下がり曲線が、波長感度の異なる3機構（錐体）間で異なっていて、定常光では白色に見える光であっても、それが断続的に与えられると、刺激のオン時あるいはオフ時において、その立ち上がり・立ち下がりのずれによって一時的に3機構間の興奮量に不均衡が生じ、色の感覚（主観色）が生じるとする説である。

この説の原型は、すでに主観色の発見者であるPrevost、Fechnerにより考えられており、同様の考えはその後も多くの研究者によって示されている（Exner, 1870；Hannay, 1881-82；Stewart, 1887-88；Liveing, 1894；Sexton, F. P., 1907；Percival, A. S., 1909；Pieron, 1922)。この説を模式的に説明すると次のようになる。

まず、受容体には3種類あり、それぞれ赤、緑、青の光に反応すると仮定する。そして、3受容体の興奮量が等しければ白が、そうでなければ（興奮量に不均衡があれば）興奮量の多い受容体の色が感覚されると考える。さてここで、時刻t 0において、白色光が網膜上に照射され始めたとし、その後の各受容体の振舞いを考える。

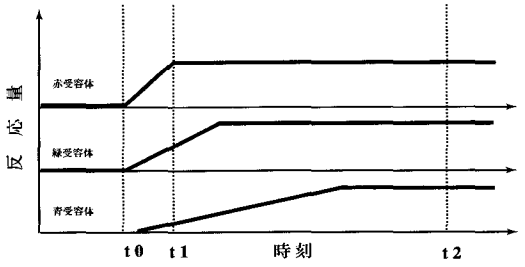

図5【感覚時間・残効時間説を説明する摸式図】
3受容体の立ち上がり時刻は一致しているが立ち上がり速度が異なっている場合、時刻t1において、赤受容体の反応量が相対的に大きく赤が感覚される。

図5は、3受容体の興奮の立ち上がり始める時間は一致しているが、その後の立ち上がりの勾配が異なっている場合である。t0から十分に時間が経過したt2では、3受容体の興奮量は等しく白が感覚される。しかし、例えばt0の直後のt1においては、赤受容体の興奮量が他の受容体に比べて相対的に大きく、この場合は赤が感覚されると考えられる。一方、3受容体の立ち上がりの勾配は同一であるが、光が届いてから興奮が始まるまでの時間が異なっている場合にも上と同様のことがいえる。

以上の2通りのケースの他にも、両者がくみ合わさった場合や、興奮の立ち上がりが直線的でない場合、さらに受容体によって立ち上がり曲線の形が異なっている場合など様々なケースを考えることができる。光が途切れてからの興奮の立ち下がりについても同様のモデルを考えうる。

この仮説が提起されたのは、色覚の3色機構が生理学的に明らかにされるはるかに以前のことであるが、3受容体を、波長感度の異なる3錐体（L-cone, M-cone, S-cone）と置き換えて考えれば、今日の色覚理論と不整合なところはまったくない。

5.3 モデュレーション説による説明

Troland(1921) は、色の情報は、単位時間内の神経インパルスの波形に変調されて中枢に伝達されると考えた。その内容は、明度はインパルスの総数に、色相はインパルスの波形に、彩度はインパルスの振幅に変換されるというものである。これはモデュレーション説（色覚変調説）と呼ばれている。

Fry(1933) は、このモデュレーション説をもとに主観色を説明しようと試みた。ベンハムのコマや、フリッカー光などのある種の輝度変化パターンを持った白色光では、光が断続するためにこのインパルスの波形が影響を受け、定常光とは違った波形になり、白色光であっても色刺激を与えるのと同様なインパルス波形を引き起こし、色の感覚（主観色）を生じさせる、というのがFryの考え方である。

5.4　感覚時間・残効時間説に関する実験的研究

〔肯定的見解〕

Ives(1918) は、色相の異なる2つの点光を同時に駆動させることによって、色機構間の反応潜時のずれを検出しようと考えた。これは例えば、赤機構が青機構よりも速く反応するならば、赤光が青光よりも先行して動いて見えるだろう、というような考え方である。彼は、実験により赤が最も速く、緑、青の順に遅いことを示した。ただし彼は、この現象を、受容細胞そのものの立ち上がり・立ち下がりではなく、周囲の細胞への反応の拡散速度の違いであると考えた。

Knehr と Lorenz(1964) は、蛍光灯のちらつきのもとで、コマからラインを取り去った、半円が白、半円が黒の円盤を蛍光灯のちらつきに同期した速度で回転させ観察した。こうすると、図形中の模様がそれぞれ一定の範囲にくる場面だけを抽出してみることができる。これによると、黒から白に替わる部分には黄が、白から黒に替わる部分には青が見えた。彼らはこのことは、立ち上がりは長波長側で速く、立ち下がりは短波長側で遅いためだろうと考えた。

〔否定的見解〕

Gebhard(1943) は、単色光の刺激によっても主観色が現れる事実は、感覚時間・残効時間説のモデルのみからは説明され得ない、とした。例えば赤の単色光の照明のもとでは、その補色である緑の主観色が現れるとの結果が得られているが、赤色光の中には緑の成分が含まれていないのであるから、興奮するのは赤錐体のみであり、3種錐体間のたち上がり・立ち下がり特性の相互関係がどうあれ、赤以外の色が生じる余地はない、というのがその論旨である。

Frost(1965) は、Knehr と Lorenz(1964) の実験と同様、蛍光灯のちらつきに同期するように、図形を回転させ、黄と青の2色を感覚した。しかし、この刺激事態を写真でとったところやはり青と黄が写った。また、蛍光灯のかわりにタングステン光を用いると色は見えなかった。これによって彼は、Knehr と Lorenzの実験結果は、蛍光灯自体の立ち上がり・立ち下がり特性が原因ではないかとして彼ら (1964) の結論を否定している。

Karvellas ら (1979) は、白色光で十分に順応させたのちにベンハムのコマを見ると、しばらくの間、順応前には赤に見えるところが緑に、同じく緑に見えるところが赤に見えた。彼らは、順応によって各錐体の立ち上がり・立ち下がりの曲線が前後にずれるとしても同じ方向にずれるはずであるから、3錐体間の相対的な順序関係は変わらず、このような逆転現象は生じないと考え、感覚時間・残効時間説を否定した。

Kozak ら (1987) は、照明強度以外は一定にしたまま、照明強度をいろいろに変化させてベンハムのコマを観察したところ、一つのライン上に見える色が、色相環を1周するように変化することを確かめた。上のKarvellas ら (1979) と同様の理由で感覚時間・残効時間説では説明不可能であるとしている。

錐体の違いは、細胞の組織そのものの違いではなく、色素の違いに基づくものであるということから考えて、錐体の違いが感覚に影響を与えるような、反応の時間差をもたらすとは考え

にくい。しかし、刺激の強度によって反応曲線が変化することは考えられる。白色が感じられるときに3錐体が等量の興奮をしていると考えることは、色覚理論を分かりやすく説明するための便宜にすぎず、現実には白色光が必ずしも3種の錐体を等量に興奮させるとは限らない。この様な意味での錐体間の興奮量の違いによって、立ち上がり・立ち下がり曲線がずれ、色が感覚される可能性はある。それゆえ、2種の点光を駆動して感覚潜時の差を求めたIves(1918)の実験結果がたとえ信頼できるものであるとしても、受容体の種類の違いによる反応潜時の違いが検出されたとは必ずしもいえない。

5.5　モデュレーション説に関する実験的研究

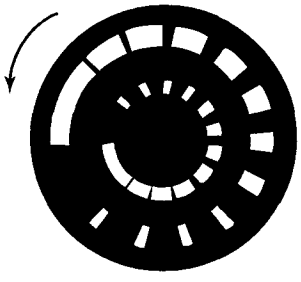

図6【Roelofsら（1957）が用いた円盤】
矢印の方向に回転させると、次第に明るくなる内側は黄に、次第に暗くなる外側は紫に色付く。

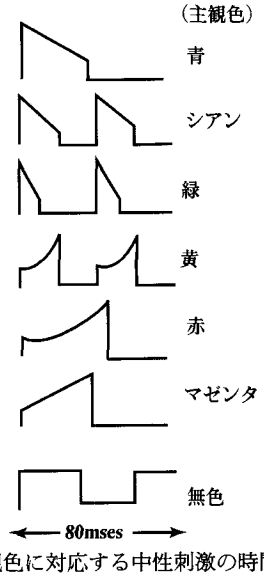

図7【各種の主観色に対応する中性刺激の時間波形】
（Festinger, 1971）
図に示すような輝度の時間変化パターンを持つ無彩色光を網膜に与えると、それぞれ右に示すような主観色を生じさせる。

〔肯定的見解〕

RoelofsとZeeman(1957) は図6の図形を反時計回りに回転させ、観察した。次第に輝度が増す内側の環は黄に、次第に輝度が低下する外側の環は紫に色づいた。Festingerら (1971) は、図7に示すように時間軸上で白熱球の輝度を変化させ、それぞれ図の右に示すような色を生じさせた。彼らは、それぞれの波形が、色光によってもたらされるインパルス波形に一致するものを生じさせたために色感覚が生じるのであろう、と考えた。

〔否定的見解〕

Jarvis(1977) は、Festingerら (1971) が用いたのと同じパターンを発生させ、追試したところ色は現れなかった。彼は、Festingerら (1971) の結果は、実験に用いられた白熱球自体の残効特性による純粋に物理的な原因によるものであろうと指摘している。

Whiteら (1977) は、色覚異常者の特性を利用してモデュレーション説が成立する可能性を確かめようとした。彼らはまず、色覚異常は色受容体における色素の欠損が原因であり、受容体以降の機構は正常であると仮定した。モデュレーション説が正しいならば、主観色を生じさせるような複雑な明滅パターンを持つ刺激によって、通常の色刺激によっては、起こり得ない神経活動を生じさせ、色刺激によっては見ることのできない色が、色覚異常者に感覚される可能性がある。それ故、もし色覚異常者がベンハムのコマで、普段経験したことのない色を感じるなら、モデュレーション説が支持されることになる。彼らは、様々なラインパターンを対提示し、ライン相互の色の類似性を評価させ、多次元尺度構成法により、各ラインに見える色を3次元空間に構成した。その結果によれば、一般に赤及び緑の主観色が生じるとされるラインについて、正常者は双方をかなり異なった色と感じているのに対し、色覚異常者は双方をほぼ同じ色と感じていることが示された。この結果は、赤と緑を混同しやすいという色覚異常者が持つ一般的な傾向に一致するのみであり、通常見たことのない色が感覚された様子はうかがえない。よって、この実験からモデュレーション説は肯定されない。

Rosenblumら (1981) は、Whiteら (1977) と同じ考えに基づき、色覚異常者の主観色の見えを、今度は色票とのマッチングにより調べた。この実験においても色覚異常者は正常者には赤、緑に見えるものについて混同したマッチングを行った。混同はあるもののマッチングそのものは容易になされ、色票とマッチングできないような色が感覚されたという事実は、実験中の様子からも内観報告からも得られなかった。

5.6　色収差による説明

Gray(1895) は、網膜像の輝度の境界に生じる、色収差が主観色の原因であるとした。彼の主張は、通常は色収差が補正されて色のにじみを感じないが、主観色の刺激事態のように断続する刺激に対してはその補正が間に合わないために色を感じる、というものである。

これに対し、金子 (1961, 1968) は、ベンハムのコマの白色部分を単色光に置き換えても主観色を生じるのだから色収差が原因ではないとしている。しかし、色収差そのものが主観色の

原因ではないとしても、単色光にも関わらずそれが断続的に与えられることにより色収差補正のメカニズムが誤作動して、主観色を生じさせることは考えうる。

6．静止刺激による主観色

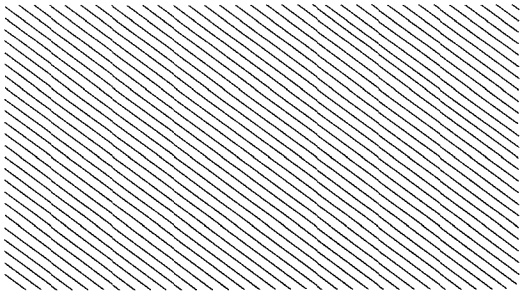

図８【Luckiesh & Moss(1933) の図形】
このような白黒図形を静止させたままで観察すると、ラインと垂直方向に色の帯が見える。

静止刺激においても主観色が生じることがある。例えば、図８の図形を静止したままにしておいてそれを観察するだけで、図形上にラインと垂直な方向の色の縞が見える（Luckiesh & Moss，1933)。金子（1968）は、このような現象は眼球の微細な運動によって網膜像がちらつき、刺激の方を変化させるのと同様の効果が生じているためであるとした。

7．ラインの意義

主観色が生起するメカニズムについては、感覚時間・残効時間説とモデュレーション説の２つが有力視され、両説についてこれを実証しようと様々に実験がなされている。しかし、上で述べてきたように、いずれについても、肯定的、否定的双方の結果が得られており、依然議論が続いている。このように、様々な試みにもかかわらず、決定的な説明が得られていないこと、とりわけ両説とも否定的な実験結果が得られていることは、以下に述べるような観点が考慮されていなかったことによるのではないだろうか。

主観色は、ベンハムのコマのようにラインが描かれたパターンにおいて最も鮮明に感覚される。それ故、主観色の生起機序を正しく予測するためには、ラインのもつ効果を考慮することが不可欠であろう。ここまでに紹介したモデルにおいては、ラインの効果を含めて生起機序を説明しようとしているものはない。

「ラインが太いと色はラインの縁に現れる」という報告が多くの研究者によってなされている。これは、ラインとその周囲との空間的関係が重要な意味をもっていることを示唆している。また、コマ（図１）やドラム（図２）のラインAとDには異なった色が現れるが、ラインの通

過部分だけを取り出せば両者における輝度の変化パターンはまったく同一である。仮にこの部分だけで色が生じるとすれば両者は同じ色になるはずである。それゆえAとDに現れる色の違いは、必然的にラインとその隣接部分（周囲）との関係の違いによるものであると考えるほかはない。

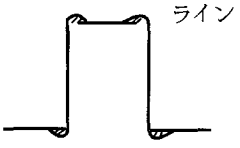

図９【色の現われ方の摸式図（Hasegawa, 1971）】
ラインが太いと斜線で示すようにラインの縁にだけ色が見える。
マッハ効果との関係が示唆される。

Hasegawa(1971) は、ラインが太いときに色が現れる様子は、模式的に表すと図９のようであると述べている。また、コマを、スリットのある円盤で覆ってラインの通過部分だけが見えるようにして観察したところ色は見えなかった。Hasegawaは、これらの実験結果を説明するためにマッハ効果をとりあげている。図９の主観色の現れ方とマッハ・バンドの現れ方はその空間的形態において共通性をもつ。それゆえこの２つの現象は類似した生理機構から生じているのでないか、という趣旨である。Hasegawaに先だってCampenhausen(1968) も、視覚系の興奮及び抑制ニューロンの側方結合を仮定することによって、主観色の生起プロセスの説明を試みている。

さて、ラインの縁にのみ色が現れるという事実のもつ意味については、２通りの解釈が許されるであろう。

第一は、Campenhausen(1968)、Hasegawa(1971) がいうような側抑制に類似した空間的相互作用である。これが側抑制と同様に抑制的なものであるか、逆に加重的なものであるかはわからない。ともかく、明るさの境界にみられるマッハ効果と類似した空間的相互作用が色機構の中にも存在しているのではないかということである。

もう一つは、「ラインが細いほど鮮明な色が現れる」という報告と併せて考えると、ライン（黒）とその周囲（白）との隣接部分が、白と黒の中間的強度すなわち灰色と同じ効果をもたらし、結果として、例えば「黒→縁（ライン＋周囲）→白」という刺激のパターンが、「黒→灰色→白」というパターンを呈示するのと同じ効果をもつのではないかという可能性である。もしこの考え方が正しいならば、ラインの替わりに、ラインとその周囲からなる部分を一様な灰色に替えても同じ主観色が現れるということになろう。しかし実際に、図10に示すような図２のラインの部分を一様な灰色に置き換えたものを用いて観察しても、ほとんど色は現れない（川村, 1991)。それゆえ、この考え方は否定される可能性が高い。またこの結果は、モデュレーション説に否定的根拠を与える。Festinger ら（1971）がモデュレーションを主張する根拠とした実験を、いま一度振り返る。Festinger らは、ある種の無彩色光の輝度変化パターンが、

色刺激によってもたらされるインパルス波形と同じものを引き起こすために主観色が生じる、と考えている。たしかにコマのライン部分が白と黒の中間的強度（灰色）の効果をもつと考えれば、図7に示されるそれぞれの主観色に対応する輝度変化パターンは、コマで同じ色を生じさせる部分のパターンとある程度一致しているが、上の結果に反するものである。

以上より、ラインは周囲との関係において灰色と同様の効果をもつのではなく、ライン部分と周囲の部分の両局面間で、隣接領域相互の色情報の空間的相互作用を引き起こす効果をもつと考えられる。

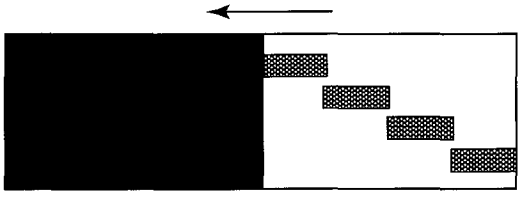

図10【図2のラインとその周囲とからなる部分を一様な灰色に置き換えた図形】

8．主観色の生起する神経レベル

川村（1991）は、ドラムにおいてライン通過部とその周囲の輝度変化パターンの位相関係のみが異なる2つの主観色について、位相のずれが2 msecあれば色の弁別が可能であることを確かめた。

神経活動に変換された刺激情報が中枢に向かって統合されるにつれ、刺激の微妙な差異は次第に丸められるだろう。それゆえ、刺激の差異が十分に小さければ、中枢に至る過程で消失すると予想される。生体の神経活動の特性からすると2 msecというオーダーは極めて小さい。CFF(臨界ちらつき頻度）は視覚系の時間解析能力の一端を示すものであるが、これをちらつきの1サイクルの時間に換算すれば、およそ17～20msecとなる。神経系の反応の時間特性や伝達過程の多層性による丸め効果と考えてよいだろう。

2 msecというような差異が、色の違いとして弁別されるということは、色覚処理系の比較的はやい段階でラインの通過部分とその周囲との色情報の相互作用により、末梢における神経活動の時間的差異が色の違いにコード化され中枢に伝達されていると考えることができないだろうか。

先述したように、単色光の刺激によっても主観色が現れる事実（Gebhard, 1943）は、感覚時間・残効時間説のモデルのみからは説明され得ない。それ故、主観色の生起については、少なくとも錘体より以降の過程が関与していなくてはならない。このことに加えて、刺激光の補色が現れやすいという点に着目すると、水平細胞層以降の反対色過程との関連が示唆される。主観色は、反対色受容野の形成過程で生じていると考えられないだろうか。

Hasegawa(1971）は、主観色現象と受容野が関係していることを、主観色の現象的大きさ

と、受容野のそれとの近似性から予測している。彼は、ベンハムのコマのラインの太さをいろいろに変えて観察し、ある一定の太さ以下ではラインの全体に色が見えることを示した。このときの、網膜上でのライン太さが、空間周波数の応答曲線などから見積もられる最小の受容野の網膜上における大きさと対応することから、Hasegawaは両者が深く関係していると、考えている。

川村（1991）によれば、一般に赤、黄、緑に見えるとされるラインパターンについては高彩度の色を感じているが、青が見えるとされるものについては見える色の彩度が低く、また内観報告によっても色がよく見えないことが示されている。一方、中心窩においては、Y／B型受容野はR／G型受容野より、圧倒的に数が少ないことが知られている。これらのことから、主観色と受容野との関連がうかがわれる。

9．なぜ色が生じるか

受容野における空間的相互作用によって主観色が生じるというのが本当だとしても、色機構間での（R、G、Bの機構間での）興奮量の不均衡が生じなければ、色の生じる余地はない。どこで色情報間の不均衡が生じているのだろうか。

3色説的応答のR、G、Bの情報は、互いに独立して中枢に送られるのではなく、相互に連絡しあって幾つかの過程を経たのち、受容野を形成して反対色説的な情報として中枢に伝達される。この3色過程から反対色過程への変換において、R、G、Bの情報伝達は相互に対等な関係にはない。例えば、反対色応答はR／G型、Y／B型の2つであるが、このうちR、G、Bの3つは3色過程の応答にもあるが、Yだけはない。Yは3色過程におけるR反応とG反応の合成であると考えられている。すなわち、反対色応答にいたるまでに、Yだけが他よりも多くの過程を要しているのである。このような段階差によってある時点で色情報間で興奮量のずれが生じている可能性が、まず考えられる。

網膜の中心窩には主に、反対色応答と関連するであろうR／G型と、Y／B型の中心周辺型受容野が存在する。またそれぞれについて、どちらが中心でどちらが周辺であるか、オン中心かオフ中心か、などの違いによる、多種の色受容野が存在していると考えられる。そして、動物の網膜に関する生理学的研究により、受容野の型の違いによってその大きさ（面積）が異なるということが調べられている。人間の網膜についても、これと大きくは相違しないだろう。色受容野は、その機能からして、一種の空間的な寄せ集め機構であると見なすことができる。それゆえ、同一機構間（例えばR同士）では、空間的に加重作用が働き、一方、反対色機構間（例えばR／G間）では、空間的に抑制作用が働いていると考えることができる。面積の違う受容野相互では、これらの加重・抑制作用に要する時間が異なるだろう。これが色情報間に不均衡をもたらす原因となっている、というのが第2の考え方である。

また、単一受容野内においても、オン領域の情報とオフ領域の情報の伝達速度には差があり、

オン領域からの情報の方が速く伝達されるという知見がある。これによって色情報に一時的に不均衡が生じる可能性が考えられる。

以上のように、主観色をもたらすのに不可欠である色情報の不均衡は、受容野における色機構間の不均衡な時間・空間特性から生じるのではないのだろうかと予測できる。

10. 今後の課題

以上、主観色現象に関するこれまでの研究を概観したが、主観色の生起機序に色覚系の空間特性及び時間特性の両方が関係していることは間違いないだろう。ベンハムのコマのような複雑な刺激を直接に扱うことによってはこれまで以上の解明は望めないものと考えられる。刺激光の分光組成や刺激の時間パターンと色の見えとの関係をさらに分析的・組織的に調べることが生起機序の解明には必要であると考えられる。

色機構の空間特性については、これまで対比効果のようなものは示されているが、明るさ機構における側抑制のようなメカニズムが色機構にも存在するかどうかについては議論が続いている。さらに、その時間特性ということになるとほとんど手がつけられていない。主観色現象はこのような議論に問題を提起するものである。主観色現象の解明のためには、主観色そのものの研究に加えて、色覚の機構全般についての、今後のさらなる心理学的、生理学的研究が望まれるところである。また逆に、主観色現象の解明への試みが、色覚機構の解明に寄与するものであると期待される。

引用文献

Abney, W. de W. (1894) The artificial spectrum top. *Nature, London,* **51**, 292.

Bagley, F. W. (1902) An investigation of Fechner's colors. *American Journal of Psychology,* **13**, 488-525.

Benham, C. E. (1894) Artificial spectrum top. *Nature, London,* **51**, 113-114.

Brewster, W. L. (1861) On certain affection of the retina. London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, **21**, 20-24.

Campenhausen, C. von (1968) Uber die Farben der Benhamschen Scheibe. *Zeitschrift fur vergleichende Physiologie,* **60**, 351-374.

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

Doniselli, C. (1907) Sui fenomeni d'induzione cromatica da luce bianca esulla natura dei processi consecutivi. *Arch. Fisiol.*, **4**, 561-593.

Exner, S. (1870) Bemerkungen uber intermittirende Netzhautreizung. *Pflug. arch. ges. Physiol.*, **3**, 214-240.

Fechner, G. T. (1838) Uber eine Scheibe zur Erzeugung subjektiver Farben. *Poggendorffs Annalen der*

Physik und Chemie, **45**, 227-232.

Festinger, I., Allyn, M. R., & White, C. W. (1971) The perception of color with achromatic stimulation. *Vision Research*, **11**, 591-612.

Finnegan, J. M., & Moore, B. (1895) The artificial spectrum top. *Nature, London*, **51**, 292-293.

Frost, B. J. (1965) Subjective colors: An objective-color artifact. *Journal of Psychology*, **60**, 251-254.

Fry, G. A. (1933) Color phenomena from adjacent retinal areas for different temporal patterns of intermittent white light. *American Journal of Psychology*, **45**, 714-721.

Fry, G. A. (1933) Modulation of the optic nerve-current as a basis for color vision. *American Journal of Psychology*, **45**, 488-492.

Gebhard, J. W. (1943) Chromatic phenomena produced by intermittemt stimulation of the retina. *Journal of Experimental Psychology*, **33**, 387-405.

Gregory, A. H. (1968) Interaction of visual stimuli. *Nature*, **219**, 734-735.

Hannay, J. B. (1881-82) Colour perception. *Nature, London*, **25**, 604-605.

原井行彦・子安一男・吉弘素次 (1961) 各種円板によるFechner Colorの研究 色彩研究, **8**, 55-60.

Hasegawa, T. (1971) Effects of spatio-temporal interaction on Fechner color. *Acta Chromatica*, **2**, 49-57.

Hess, E. H. (1952) 'Subjective' colors: retinal vs. central origin. *American Journal of Psychology*, **65**, 278-280.

Ives, H. E. (1917) Visual Diffusivity. *Pshilosophical Magazine*, **33**, 18-33.

Ives, H. E. (1918) The resolution of mixed colours by differential visual diffusivity. *Pshilosophocal Magazine*, **35**, 413-421.

Jarvis, J. R. (1977) On Fechner-Benham Subjective Colour. *Vision Research*, **17**, 445-451.

金子隆芳 (1961) 主観色について (Benhamのコマを中心に) 照明学会雑誌, **39**, 438-440.

金子隆芳 (1968) 色の科学－その精神物理学 みすず書房, Pp. 160-182.

Karvellas, P. C., Pokorny, J., Smith, V. C., & Tanczos, Z. (1979) Hue reversal in the Fechner-Benham color effect following white light adaptation. *Vision Research*, **19**, 1277-1279.

川村 智 (1991) 主観色の生起機序に関する研究 平成2年度大阪大学人間科学部卒業論文

Klopsteg, P. E. (1931) A curious color phenomenon. *Science*, **73**, 590.

Knehr, C. A. (1953) Individual differences in subjective color. *Journal of Psychology*, **36**, 289-294.

Knehr, C. A., & Lorenz, R. J. (1964) Subjective color: A new method of producing the phenomenon . *Journal of Psychology*, **58**, 353-356.

Kozak, W. M., Reitboeck, H. J., & Meno, F. (1987) Subjective color sensations elicited by moving patterns: Effect of luminance., In Kulikowski, J. J., Dickinson, C. M., & Murray, I. J. (Eds.) *Seeing Contour and Colour. Pergamon Press.* Pp. 294-310.

Liveing, G. D. (1894) On Benham's artficial spectrum top. *Nature, London*, **51**, 167.

Luckiesh, M., & Moss, F. K. (1933) A demonstrational test of vision. *American Journal of Psychology*, **45**, 135-139.

Percival, A. S. (1909) Colour phenomena due to intermittent stimulation with light: note on the colours

of Benham's top. *Trans. opthal. Soc. U. K.*, **29**, 119-125.

Pieron, H. (1922) Le mechanisme d'apparition des coleurs subjectives de Fechner-Benham. *Annee psychol.*, **23**, 1 -49.

Pieron, H. (1923) Des lois du desequilibre chromatique initial et de la preponderance de la diffusion chromatique dans l'excitation lumineuse de la retine. *C. R. Soc. Biol. Paris*, **86**, 922-925.

Prevost, B. (1823-26) Sur une apparence de decomposition de la lumiere blanche par le mouvement du corps qui la reflechit. *Memorires de la Societe de Physique et d'Histoire naturelle de Geneva*, **3**, 121.

Roelofs, C. O., & Zeeman, W. P. C. (1957) Color phenomena associated with increase and decrease in physical brightness. *Acta Psychologica (Amsteldom)*, **13**, 173-196.

Rood, O. N. (1860) ON a new theory of light, proposed by John Smith. *American Journal of Science and Arts*, **30**, 182-186.

Rosenblum, K., Anderson, M. L., & Purple, R. L. (1981) Normal and color defective perception of Fechner-Benham Colors: Implications for color vision theory. *Vision Research*, **21**, 1483-1490.

Sexton, F. P. (1907-08) The spectrum top. Phys Soc. Lond., 21, 392-395.

Skinner, B. F. (1932) A paradoxical color effect. *Journal of General Psychology*, **7**, 481-482.

Smith, F. J. (1948) Apparent decomposition of sunlight by intermittent refrecting surface. *Nature, London*, **24**, 140.

Stewarrt, G. N. (1887-88) Is the law of Talbot true for very rapidly intermittent light? *Proc. roy. Soc . Edinb.*, **15**, 441-464.

Troland, L. T. (1921) The enigma of color vision. *Amer. J. Physiol. Opt.*, **2**, 23-48.

Way, E. F. (1932) Entopic colours. *Science*, **75**, 81.

White, C. W., Lockhead, G. R., & Evans, N. J. (1977) Multidimensional scaling of subjective colors by colorblind observers. *Perception and Psychophysics*, **21**, 552-526.

Discussion on Experimental Studies on the Mechanism Generating Subjective Color Phenomenon

Yoshiaki NAKAJIMA and Satoru KAWAMURA

There is a curious phenomenon called "subjective color" which is a color sensation induced from achromatic stimulation. The sensation can be obtained by intermittent achromatic light or rotation of a disk with black and white pattern. The phenomenon was reported firstly in 1823 by Prevost and since then many researchers have found the same phenomenon by themselves. Today, it is obvious that the phenomenon can't be explained only with physical law of light. The phenomenon is now assumed to occur when a certain achromatic pattern of light induces the same excitation of human color mechanisms that is induced by chromatic light.

A number of studies have revealed various phenomenological aspects of this sensation. The colors seen change with brightness of illuminance, and spatial and temporal pattern of stimulation. There are two dominant hypothetical theories to explain the mechanism of the phenomenon. One is "onset/offset velocity theory." This theory assumes that time constants - onset and offset velocity - of three types of color channels, i. e., L, M, and S cones, are different. If so, when achromatic light is presented intermitterntly, the ratio of neural activities of the three channels would be unbalanced at the beginning of or the end of lightning and the color sensation would occur according to the ratio of the activities of the channels. The other theory is "modulation theory." This theory assumes that color information is transferred to the temporal pattern of neural activities similar to the Morse Code. If an achromatic stimulus are presented intermittently, it is possible for the stimulus to induce the temporal pattern of neural activities that is given by chromatic stimulus. Both of the theories have been partially supported by experimental studies. But negative evidences also exist for both the theories. It seems that each of the theories explains only a part of aspect of the phenomenon and that including some additive explanation is needed to fully describe the phenomenon.

Recently, some spatial interaction on the retina in color processing system similar to lateral inhibition is pointed to relate with producing subjective color. Such kind of idea is brought from the finding that subjective color is more saturated at the boundary of spatial elements of stimulus and that the spatial characteristics of appearance of subjective color is like that of Mach Band. Indeed, this kind of lateral interaction couldn't explain subjective color independently. Unless temporal unbalance of activities of different color channels occurs at some stage of color processing, there would be no room for achromatic stimulus inducing color

sensation. It is certain that both of temporal and spatial properties of color processing system is related to the occurrence of subjective color.

All the explanations mentioned above haven't been given enough empirical evidences. It would be difficult to directly clear the mechanism of subjective color only by using the stimulus that have been used so far. It will be needed to investigate the fundamental temporal and spatial properties of human color system analytically and systematically. On the contrary, it is also expected that an attempt to clear the subjective color phenomenon will give a clue to clear the basic mechanism of human color vision that hasn't been revealed sufficiently.