J. Soc. Cosmet. Chem. Jpn.
総説
28(3) 215 - 222 (1994)

色 と 見 え

馬場護郎

株式会社村上色彩技術研究所†

Color and Appearance

Gorow Baba

Murakami Color Research Laboratory.†

1. は じ め に

物体の色を認識するためには、照明光と物体と眼とが必要である。

照明光のもととなる光源としては、太陽、白熱電球、放電灯などがあり、その特性は分光組成と放射量、及び放射の空間分布によって規定される。しかし、実際に物体に照射する照明光は、それが通過する透過物体や反射面によって、その分光特性や空間分布が変化していることが多い。一方、心理物理的に測色値を求める従来の方法は、規定された分光分布を持つ照明光が、規定された一方向から、または完全拡散状態で物体に照射することを仮定して計算するので、実際の視感の状態とは一致しないことが多い。

物体の反射・透過特性についても、従来は、非金属不透明物体からの反射光は、主として色に関係する均等拡散反射光と、光沢に関係する表面反射光から成るとされ、透過物体の透過光は、主として色に関係する正透過光と、濁りに関係する均等拡散透過光から成り立つとされていた。しかし、実在する物体の反射・透過特性は様々の様相を呈し、特に近年は観察方向によって分光分布や空間分布が変化するものが、不均質感、不安定感を与えるもので注目される傾向があり、これらの面の見えの解析が重視されている。

照明光によって照射された物体を見て色が認識されるが、眼に与えられた刺激がどのように処理されて認識されるかが問題となる。この問題についてはまだ明かでない部分が多いが、ここでは、現在の考え方の概略について触れ、次に主として物体反射・透過光の物理的性質と質感との関係について述べる。

2. 色覚、色順応、色見え

光が眼に入り、その情報が変換されて大脳に至る視覚系は、次の三系統に分けられる。外界の像を網膜上に結ぶ光学系、網膜の受容細胞で受けた情報を電気信号に変換・処理し、視神経を経て大脳に送る視覚伝達系、伝達された生理的刺激を処理し、認識する大脳視覚系である。網膜内細胞には、桿体 (rod) と錐体 (cone) と呼ばれる光受容器細胞がある。錐体には、夫々、可視域の長・中・短波長域に感度のピークを持つ L, M, S の三種があって、これらが色の認識に関係する。桿体は、明暗の感度は良いが色の認識には関係しない。色の情報がどのように伝達され、色として認識されるかについては、種々の色覚モデルが提案されている。Fig-1 は、池田ら¹⁾による色覚モデルで、L, M, S 錐体からの三色信号は信号処理されて、明暗信号 V と、r-g, y-b の反射色信号として伝達され、明るさと二種の色質信号として認識される。暗所視の場合、桿体からの暗所視明度信号 V' が伝送される。大脳視覚領に達した信号は、順次、

† 〒104 中央区勝どき 3-11-3; 3-11-3 Kachidoki
Chuo-ku 104 Japan

Fig.-1 色覚モデルの例 (池田, 芦沢)

視覚野へ伝送される毎に、より高次の処理を受けて、色を含め複雑な視覚認識となると言われる。

白い物体は、昼光下でも蛍光灯下でも同じように白く見える。これは、色彩恒常と呼ばれ、フォン・クリースの係数則などによって説明された。これは、網膜における三種の受容器の感度が、順応刺激の強さに逆比例して変化するという仮説で、或る照明下の三刺激値は、他の照明下の三刺激値の線型変換によって求められる。この仮説は、色順応の第一近似としては正しく、近似した照明間の予測には実用できるが、次のような効果は予測できない。

- 1) 同じ照明でも照度を上げると、白いものはより白く、黒いものはより黒く見える (ステイプンス効果)。
- 2) 同じ照明でも照度を上げると、有彩物体色の鮮かさ (カラフルネス) が上って見える (ハント効果)。
- 3) 色光照明下では、白い物体にはその照明光の色相を、黒い物体には補色の色相を感じる (ヘルソン・ジャッド効果)。

これらの効果を説明し得る色順応予測式を求めて、CIE では、納谷らの非線型モデルに基づく色順応式を提案し、現在実地試験を行っている。この色順応予測式は、試験照明 I の下の試験視野 F

で試験色の三刺激値 X, Y, Z を与えると、基準照明 I' の下の基準視野 F' で試験色と同じ見えを与える対応三刺激値 X', Y', Z' を求めることができるもので、次の手段による。

- 1) 試験色の三刺激値 X, Y, Z から基本原色系での三刺激値 R, G, B への変換 (線型変換)。
- 2) 試験色の三刺激値 R, G, B から対応色の基本原色系での三刺激値 R', G', B' への変換 (非線型変換)。

この色順応予測式によって、異なる色順応条件での対応色を予測することが可能となり、更に次のステップとして、観測者の色感覚に対応する見えの予測が可能になりつつある。

一般に我々が物を見るときの見えの属性には、次のものが含まれる。これらは、色、時間的变化、空間的变化である。色には、色相、明るさ、色みがある。時間的变化には、ちらちら、きらきら、ゆらぎ、動きなどがある。空間的变化には、大きさ、形、位置、数、テクスチャー、まぶしさ、透明さ、つやなどがある。これらの属性は、互に作用し合って認識される。

3. 条件等色

三刺激値は、照明光の分光パワー分布、物体の分光反射 (透過) 率係数、標準観測者のスペクトル三刺激値の可視波長域での積和で求められる。従って、三成分の中の一つの分布が異っても、積和である三刺激値が等しくなる条件は無数にあると言える。このことを条件等色と言い、三成分の内どれが異なるかにより次のように区別する。

- 1) 照明光の分光分布が異なる場合 (光条件等色)。
- 2) 物体の分光反射 (透過) 率係数が異なる場合 (物体色条件等色)。
- 3) 観測者のスペクトル三刺激値が異なる場合 (観測者条件等色)。

条件等色は、照明光、物体色、受光器などの性能や相似の度合を評価するのに用いられる。

JIS Z8720 「測色用の標準の光及び標準光源」の付属書では、標準の光の下で等色となる代表的

な条件等色対五つの分光分布を規定し、試験光の下でどの程度条件等色がくずれるかによって、試験光と標準の光の近似度を評価しようとしている。

JIS Z8719「物体色の条件等色度の評価方法」では、基準光の下で等色である条件等色対が、試験光の下でどの程度色がくずれるかによって条件等色の程度を評価しようとするもので、JIS では代表的な試験光として12種の蛍光ランプの分光分布を約束している。

JIS Z8726「光源の演色性評価方法」では、定められた幾つかの試験色が、基準光と試験光の下でどの位異って見えるかによって試験光の演色性を評価しようというもので、JIS では、平均演色評価数を求めるために各色相から広く選ばれた試験色と、特殊演色評価数を求めるために、鮮かな色、肌色、草木の色などを代表する試験色の分光分布を約束している。

人間の眼は、色覚異常者を除いても、個人間のスペクトル三刺激値は異なるし、同一人でも水晶体の黄色色素沈着により年令とともに変化する。従って、標準観測者に対して等色であっても、個々の観測者にとって等色となるとは限らない。JIS Z8718「観測者条件等色度の評価方法」では、基準観測者が一定の測色用の光の下で等色であるとする条件等色対を、個々の観測者が観測したときの等色の外れの程度を観測者条件等色度として

約束している。JIS では、標準観測者とは異なるが、正常色覚の個々の観測者の等色関数を、Stiles が測定した20人の等色関数の解析より求めて、偏差基準観測者の等色関数を約束している。また、特定の年令の正常色覚観測者を代表する観測者を規定し、ある年令の年齢別平均観測者が等色と判断する条件等色対を、他の年齢の観測者が観測したときの等色の外れを予測することができる。

4. 物体の幾何光学・物理光学的性質

ものの見えに関する従来の測定技法は、物体表面の反射・透過特性が、次のような典型的なものとする推定の上に成り立っていた。

① 不透明非金属反射物体

Fig.-2aの実線に示すように、層内からの拡散反射光は均等に分布し、その分光分布は、その物体の色を表わす。表皮からの正反射光は、色には関係なく、光沢に関係する

② 不透明金属物体

金属面からの反射光は全て表面からの反射光で、層内に入った光は全て吸収される。金属の色は表皮反射光の分光特性によって決まり、その空間分布は表面の形状による

③ 半透明透過物体

Fig.-2bの実線に示すように、物体の色は均等拡散する拡散透過光の分光特性により決まり、透明度は拡散透過光と正透過光の比率によ

Fig.-2 反射・透過光の空間分布

る。光の入射する面の反射光は、光沢に関係する

④ 透明物体

物体の色と透明度は、正透過光の分光特性とその大きさによる。光の入射する面の反射光は、光沢に関係する

何れの場合も、物体に入射する光は物体により反射するか、透過するか、吸収されるかの何れかである。

しかし、実在の物体ではその反射・透過特性は上のように典型的なものではなく、次のような種々の問題がある。

a) 反射・透過光の空間分布

物体がある方向から照射されたとき、その反射または透過光の空間分布が均等拡散（どの方向から観測しても輝度が一定であるか、または光度が余弦則に従うこと）であることは極めてまれで、多くの場合、観測方向によって明るさや分光分布が変化する（Fig.-2 の点線の分布）高光沢のソリッド・ペイントなどでは表皮からの鏡面反射を除けば、層内からの拡散反射光はほぼ均等拡散であるが、中光沢以下のペイント面からの反射光は層内拡散光に方向性のある表皮拡散光が重なるので、方向性のある反射光となる。

金属面の反射光の空間分布は、表面の平均面に対する小素面の傾斜角によって決まる。

このように、方向性のある反射光を測定する場合、測定器の照明及び受光の幾何学的条件によって測定結果が変化するので、日本工業規格 JIS-Z-8722 ではかなり細かくこの条件を約束している。

b) 蛍光・りん光など

物体にある波長の光が照射されたとき、吸収された光が波長を変えて再放出される現象が蛍光である。蛍光を含む物体色は、照射する光の波長と同じ波長で反射する真の反射光成分と、波長を変えて発光する蛍光成分が加算されたもので、両者の比率は照射光の分光分布によって変化する。蛍光を含む物体色の反射光成分と蛍光成分とを個別に規定するには、二分光器法による。

JIS Z8717「蛍光物体色の測定方法」では、蛍

光性の反射物体を標準の光 D_{65} で照射したときの物体の色を予測する方法を規定している。蛍光物体色の測定の際の問題点は、標準光源 D_{65} が実在しないことで、そのため JIS では、試料面照射光の分光分布がどの程度標準の光 D_{65} のそれに近似しているかを判定するため 9 種の試験色を規定し、その測定から試料面照射光の紫外及び可視蛍光測色誤差指数を求めることにしている。

蛍光増白物や有彩色蛍光試料のように明かに蛍光を発していることが知られるものの他に、染色物や自然物には僅かに蛍光を発するものが多いので注意すべきである。

c) 干渉・回折

カラーステンレスはステンレスの表面にごく薄い酸化皮膜を付けたもので、薄膜の干渉によって鏡面反射方向の反射光が強く着色して見える。鏡面反射光を分光測定するとその干渉波形から光学的膜厚が求められる。このように鏡面反射方向が強く着色して見えるものは金属光沢感を与える。

パールマイカ顔料は、基本的にはマイカ粉の表面に薄い酸化チタン層を付けたもので、酸化チタン層の厚みが $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 程度であると可視域に一次の干渉色が観測される。干渉光は鏡面反射方向で観測されるので、パールマイカペイントの場合、層内でのパールマイカ粉の配列によって平均面の鏡面反射方向を中心としたある広がりの方に干渉光が分布し、観測方向によって見えが複雑に変化してフリップ・フロップ感を与える。

Fig.-3 は、パールマイカペイント試料を -45° 方向から照射し、 -25° から 60° まで観測角を変えたときの色相 h_{ab} 及び彩度 C_{ab}^* の変化を示したものである。図中 225 及び 235 は透明性のパールマイカペイントを赤色下地の上に塗布したもので、拡散反射方向では下地の色が見えるが、観測角をかえると干渉色が強くなり、色相が大きく変化する。A 及び K は不透明パールマイカペイントを白色下地の上に塗布したもので、干渉色のみが観測され、その彩度が大きく変化することを示している。

南米産のモルフォ蝶の羽根は鮮かな色彩で有名だが、その鱗粉の断面を走査電顕で観測すると、

Fig.-3 パールマイカペイントの観測方向による色相・彩度の変化

0.1~0.2 μm の規則正しい凹凸が観測される。この凹凸は鱗翅の方向にそって並んでいるので観測方向で回折光の色が大きく変化する。Fig.-4 は、モルフォ蝶の羽根を -45° 方向から照射し、観測角を -25° から 60° まで変えたときの分光分布の変化を示したもので、これから計算で求めた色相・彩度の変化は Fig.-5 に示す様になる。Fig.-5 はモルフォ蝶の下羽根を鱗翅に平行、 45° 垂直の方向で -45° から照射し観測方向を変えた時の色相・彩度の変化で、平行方向では観測方向により彩度が大きく変化する、垂直方向では色相が青緑から紫まで大きく変化することが知られる。

d) メタリック感

金属面の反射が、非金属面のそれと大きく異なるのは次の点である。

- ① 金属面の鏡面反射率は、鏡面反射角に関わらず大きな値を持つ（非金属面ではフレネル則による）

- ② 金属面の鏡面反射光は、その金属の色に着色している（非金属面では殆んど非選択的である）

- ③ 金属面では、偏光角はない

これらの性質の内いくつかを持つと、非金属面でも金属感を与える。カーステンレス、金色アルマイト、箔押し用フオイルなどはこの例である。

金色アルマイトは、高反射率のアルミ表面に酸化皮膜を作り、これを黄色染料で着色したもので、鏡面反射光の強度が強く、且つ着色しているため金属感を与える。

金属粗面の場合、反射光は全て表皮反射光であるが、表面の小素面の傾斜によって反射光が散乱する。

メタリックペイントは、透明性のある樹脂層に偏平なアルミ粉を分散させたもので、アルミ粉の配向によって反射光が鏡面反射方向に集中し、且

Fig.-4 モルフォ蝶の羽根の観測方向による分光分布の変化

Sample: Morpho (Lower)

Fig.-5 モルフォ蝶の羽根の観測方向による色相・彩度の変化

つそれが樹脂層を通るため着色するので、メタリック感、フロップ感を生じさせる。

e) ブロンズ色

高屈折率の顔料粒子を含んだ塗装面や印刷面では、樹脂が色料粒子を覆っているときは通常为非金属的な反射をするが、樹脂層から色料粒子が露出して空気との界面に接するようになると、屈折率差が大きくなるため、いわゆる金属面的な表面色を発するようになり、樹脂層内では吸収していた光を反射する様になる。このため塗装面や印刷面の表面に、その塗膜自体の色とは補色をなす色が観察される。この現象をブロンズ現象と呼び、鏡面反射方向に着色するため金属感を与える。

f) 半透明体の色

塗装面などのように、比較的透明な樹脂層の中に、光の波長に比して大きく不規則な形の粒子が存在する系では、層内の光はほぼ均等拡散に近い状態で反射されるが、半透明に近い物体では様相が異なる。半透明プラスチック、石鹼、バター、乳飲料、ジュース、皮膚などでは、層内の光は微

細な粒子によって散乱されるが、その様相は光の波長と粒径によって散乱の方向、強度が異なるため照明及び観測の方向により色が変化して見える。このような試料では、試料の大きさや厚み、照明される面積と観測する面積の比、照明及び観測の方向によって、分光分布が異なって観測される。

5. 表面の質感と物理的性質

近年、表面外観の多様化、高品質化が進むにつれて、表面外観の評価表現も多様かつ複雑になってきた。これらの評価表現の中にひそむ評価因子を明かにするため、SD 法などを用いた解析が多く発表されているが、これら評価因子と表面の物理的性質との関係は、まだ明かでないが多い。

森田²⁾は、塗装外観と表面形状について次のように論じている。これによれば、塗装外観は次のように分類される。

- a) A群—表面形状と最表層の物性に関するもの
 - a)-1) 光沢感—キラリと輝いている感覚
 - a)-2) 平滑感—鏡のような滑らかさ
- b) B群—塗膜の多層の構造に関するもの
 - b)-1) 透明感—塗膜上部に透明な層がある感覚
 - b)-2) 深み感—塗膜内部から光がきいている感覚
 - b)-3) 二層感—塗膜が何層も塗られている感覚
 - b)-4) 肉持感—たっぷり膜が塗られている感覚
- c) C群—塗膜内粒子の配向的構造に関するもの
 - c)-1) 陰影感—見る方向により明暗が変化する感覚
 - c)-2) 光輝感—小さな粒子がキラキラする感覚

一方、塗膜の表面形状を解析するため、塗膜表面の断面曲線を周波数分析し、断面曲線のパワースペクトルと、塗膜外観との関係を見ると次のようになる。

- ① 短波長域（波長、数 $10\mu\text{m}$ 以下）

日視では形状認識できず、光沢の低下や、塗膜面に写る像のコントラスト低下として認識される

- ② 中波長域（数 $10\sim$ 数 $100\mu\text{m}$ ）

比較的小さい形状で、近くでは形状認識ができ、微小肌、ウジ感、ムジ感のような表現がされる

- ③ 長波長域（数 $100\mu\text{m}\sim$ 数 mm ）

ゆず肌に代表される比較的大きな形状で、塗膜面に写った像の形の歪みとしても認識される

更に、結像波形のパワースペクトルを用いて、写像鮮映性を波形の歪みとコントラスト低下に分けて評価し、この二次元的評価により鮮映性をより良く評価できるとしている。

このように、塗膜の写像鮮映性と、表面形状及び光の反射特性については、ある程度関係が明らかとなってきたが、更に複雑な質感となる、深み感、透明感、肉持ち感などについては、漸く検討が初められたのが実状である。

6. おわりに

色と見えについて、色覚、物体表面の光学的性質、見えの評価について解説したが、何れについても、現在その研究が進行中であって結論が得られているわけではない。一方、感性に関する評価についても各分野で重要視されている。この分野の検討にあたっては、夫々の他の分野の検討にも関心を持って研究する必要があると考えて、この解説を作った。種々の分野の方々の参考となれば幸甚である。

参 考 文 献

- 1) 池田光男、芦沢昌子、「どうして色は見えるのか」平凡社（1992）
- 2) 森田 操、塗膜の表面形状と質感、色材協会関東支部「アニソトロピックカラーの計測と塗膜質感」講演会資料、p.23（1992）

本文中、日本工業規格をいくつか引用したが、これら規格には、詳細な解説が付けられているので、それらを参照されることが望ましい。

JIS Z8719 物体色の条件等色度の評価方法
JIS Z8718 観測者条件等色度の評価方法

JIS Z8722 物体色の測定方法
JIS Z8717 けい光物体色の測定方法

(1994年6月27日受理)