

# 同系色の色素色と構造色を組み合わせた色材の開発

小野 洋介（機械・材料技術部ナノ材料グループ）

## 1. はじめに

光は波の性質を持つ。個人差はあるが、波長がおおよそ 400 nm から 800 nm の範囲にある光を私たちは見ることができ、光の波長の違いを色として見分けている。それぞれの色が持つ印象は異なり、色はデザインの基本要素の一つと言える。

身の回りにある物の多くは、顔料や染料で着色されている。色素による色であるため、色素色とも呼ばれている。色素が可視光の一部を吸収し、その他の光を反射すると、私たちの目には反射された光の色（有彩色）が見える。全ての可視光を反射すると白に、全ての可視光を吸収すると黒に見える。色素色を混ぜるほど吸収する色の光が増え、灰色や黒色に近づく。つまり、色素色は「色の三原色」の法則に則ると表現できる。色材の中でも耐候性や耐熱性、耐久性が求められる用途には、無機物質の顔料が用いられている。これらの色は、重金属化合物による光吸収を原理としており、コバルトブルーやカドミウムイエローなどと呼ばれるように、いわゆるレアメタルが使われている顔料が多い。

一方、可視光を吸収しない物質も、その構造が特定の条件を満たすと有彩色を生じる。構造による色であるため、構造色と呼ばれる。図 1 の模式図に示すように、ある波長の可視光を構造が強め合うように反射すると、その波長に応じた色を生じる。身近な事例では、無色の石鹸水の薄膜構造がシャボン玉の干渉色を生じる現象がイメージしやすい。構造色を混ぜるほど反射する光が増えるため、白色に近づく。この観点では色素色と対照的であり、構造色は「光の三原色」に則ると言える。構造色は構造で発色する原理上、化学組成の縛りが無い。

KISTEC では、酸化ケイ素粒子による構造色技術を開発してきた（図 2）<sup>1)</sup>。酸化ケイ素は、クラーク数において資源豊富な上位 2 元素である酸素とケイ素の化合物である。宝石のオパール<sup>2)</sup>の構造色を人工的に模倣した物質であり、人工オパールなどと呼ばれている。人工オパールの塊は人工宝石として販売されているが、KISTEC では人工オパールの粒子を塗って使う研究を進めている。構造色の原理を利用して、見る角度によって色が変わる特徴を持つ国宝「曜変天目茶碗」のレプリカ<sup>3)</sup>や、水を注ぐと下地の花模様が見える花器<sup>3)</sup>を制作してきた。これまでは人工オパール単体を対象に研究してきたが、今回、普遍的な絵具（色素色）と人工オパール（構造色）を組み合わせることで、濡れると色が変わる色材や、下地の色に影響されずにほぼ一定の色を呈する色材が得られた。前者の色材は既に他で発表<sup>4)</sup>したため、ここでは後者の色材を紹介する。

## 2. 実験結果及び考察

人工オパール粒子分散液は、既報<sup>1)</sup>と同様に、オルトケイ酸テトラエチルをエタノール水溶液と混ぜ、アンモニア水を添加して作製した。試薬の混合比を変えると図 2 における粒子の大きさが変わり、粒子の配列構造が強く反射する光の波長が変わる。つまり、試薬の混合比で構造色の色味を制御できる。詳細は前述の既報を参照いただきたい。

人工オパール粒子分散液を筆で黒い紙に塗ると、構造色を明瞭に視認できたが、白い紙では色がほとんど見えなかった。一例として、緑色の構造色を持つ人工オパール粒子分散液の実験結果を、分光光度計（（株）島津製作所、SolidSpec-3700i）で測定した全光線反射スペクトルと併せて図 3 に示す。真ん中の図が外観写真であり、左側が黒い紙に塗った場合の反射スペクトル、右側が白い紙に塗った場合の反射スペクトルである。黒い紙に人工オパールのみを塗った場合（図中の青色のスペクトル）は、緑色に相当する 500 nm 付近にピークが確認できるのに対し、白い紙に塗った場合では下地に用いた白い紙にスペクトルの形状が似ており 500 nm 付近にピークは確認できなかった。図 1 に示したように構造色は光反射を発色原理とするため、光を吸収し反射率の低い黒い紙に塗った方が、白い紙に塗った場合に比べて紙と塗布面の反射率のコントラストが大きくなり、色を視認しやすくなると考えられる。一方、色素色である緑色の市販絵具（（株）サクラクレパス、ACW12）の場合（図中の橙色のスペクトル）は、黒い紙では色が見づらく、白い紙に塗ると色を視認しやすい結果となり、人工オパールの実験結果と対照的であった。

粒子レベルで人工オパール粒子に黒のベース色を付与すれば白い紙上でも構造色が視認できると考え、分散液に黒色の市販絵具（（株）サクラクレパス、KGW6A）を混ぜた。しかし、これを白い紙に塗ると、特に塗布部の縁に絵具の黒色が顕在してしまい、本研究の目的とする「一定の色」とかけ離れていた。そこで、黒色の絵具に加えて、

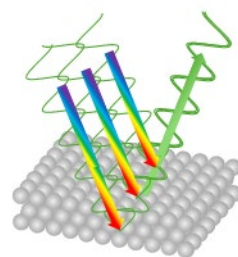


図 1 粒子充填構造による構造色の原理

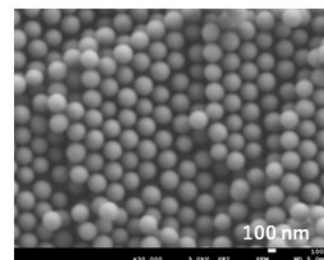


図 2 人工オパール塗布面の電子顕微鏡観察像



図3 黒い紙と白い紙に緑系の粒子分散液を塗布した外観と分光光度計で測定した反射スペクトル

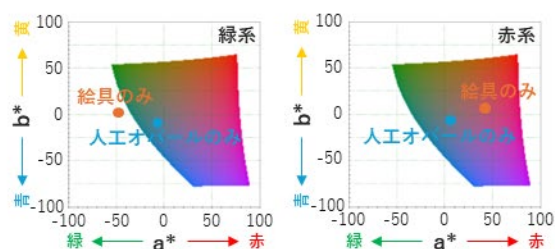


図4 実験に使用した人工オパールと市販絵具のa\*b\*色座標



図5 黒い紙と白い紙に赤系の粒子分散液を塗布した外観



図6 開発品を黒い紙に重ね塗りした外観

人工オパール粒子分散液の構造色と同系色の絵具を添加した。また、明度の調整を主な目的として、白色の絵具も添加した。一例として、緑色の構造色を持つ人工オパール粒子分散液に、黒色、白色、緑色の絵具を添加して緑色の構造色と色素色を持つ分散液を作製した。この分散液（開発品）は、図3に示すように、黒い紙に塗っても白い紙に塗っても緑色を明らかに視認でき、その色はほぼ同じに見えた。

図3の開発品に用いた人工オパール粒子分散液と市販絵具について、分光光度計で測定した色座標（ $L^*=50$ ）を図4aに示す。色座標では、横軸の $+a^*$ が赤方向、 $-a^*$ が緑方向、縦軸の $+b^*$ が黄方向、 $-b^*$ が青方向を表し、数値が大きいほど彩度が高いことを表す。つまり、この色座標において、色味（色相）は原点からプロット点を結んだ直線の角度で表せる。人工オパール粒子分散液の緑色の色相角度は $229.2^\circ$ であり、市販絵具の緑色の色相角度は $176.7^\circ$ であった。同様に、赤系の人工オパール粒子分散液と市販絵具を用いた実験結果を図4bと図5に示す。これらの実験結果から、人工オパールと絵具の色相角度の差が $60^\circ$ 以内であれば、黒い紙に塗っても白い紙に塗っても目視でほぼ同一に見える色を出せると判断した。また、緑系の開発品を黒い紙に重ね塗りした外観写真を図6に示す。蛍光灯の光を正反射する条件下においては緑色がキラキラ輝いて見えた。つまり、本研究の開発品は、色素色には無い、構造色特有の色の特徴を発現したことが分かった。

### 3. おわりに

「色の三原色」に則る色素色と「光の三原色」に則る構造色を組み合わせることで、下地の色に影響されることなく、視認しやすいほぼ一定の色を呈する色材が得られた。色素色のみを利用した同様の製品が知られているが、本研究の開発品は構造色特有のキラキラ輝く色を出せる点で異なる。また、構造だけでなく化学組成もオパールを模倣しているため、「人工宝石の色」と謳える点にもメリットがある。一例として、“どんな色の紙にも使える”ボールペンや絵具への利用を想定している。色材メーカーだけでなく、自社製品の加飾に使っていただくケースも含め、技術移転先となる企業を募集している。

### 【参考文献】

1. Y. Ono, *Journal of Asian Ceramic Societies*, 8, 578-585 (2020)
2. 小野洋介, 日本デザイン学会第70回研究発表大会 デザイン学研究, 70, 520-521 (2023)
3. 小野洋介, 日本デザイン学会第71回研究発表大会 デザイン学研究, 71, 522-523 (2024)
4. 小野洋介, 日本デザイン学会第73回研究発表大会 デザイン学研究, 73, in press