

シャボン玉の科学の教材化 (1)

—加法混色・減法混色と色の見え方について—

松 村 敬 治

The Science of Soap Bubbles as a Means of Teaching the Pleasure of Learning Science(1): With Special Reference to Additive and Subtractive Mixture of Color and their Respective Ways of Recognizing Color

Keiji Matsumura

はじめに

シャボン玉は多くの人々を惹きつける不思議な魅力を持っている。今にも壊れそうな薄い膜でできた球体構造、透き通った表面に流れるように現われる淡い虹色の輝き、割れるときに感じる儂さなど、シャボン玉の魅力は語り出したら枚挙の暇が無い。シャボン玉は身近な材料を用いて手軽に楽しめるにもかかわらず、膨らみはじめてから壊れるまでの短いドラマの中に科学の様々な分野の基本的な要素を含んでいる。シャボン玉を科学的な対象として捉える場合、「石けん液から泡ができる理由」、「薄い膜から球体が作られる理由」、「表面が虹色に輝く理由」などが興味を中心になるが、こうした問いを解き明かす過程で自然科学の様々な分野の現象が関与しているのである。本稿の主題である「シャボン玉の科学の教材化」というシリーズは、児童・生徒の理科離れが問題になっている昨今において、シャボン玉の魅力の一つずつ取り上げて解明し、解説する過程を通して、自然科学の基本的な要素を遍く学ぶことができるような教材を提供することを目的としている。

本稿は、そのシリーズの第一弾として、「加法混色・減法混色と色の見え方について」というサブタイトルで、「シャボン玉の表面が虹色に輝く理由」に

関連した教材について解説する。

「光と色の見え方の関係」の学習で使用する教材

シャボン玉に美しさを感じる理由の一つはシャボン玉の表面が虹色に輝いて見えることであろう。「シャボン玉の表面が虹色に輝く理由」を完全に理解するためには「光の干渉」と「光と色の見え方の関係」について理解する必要があるが、両者は異なる物理現象を含むので別々に説明して、その後統合して解説する方が、理解が容易である。「光の干渉」については、拙著の「可視分光によるシャボン玉の膜の厚さの測定」の中¹⁾で一応触れているので、ここでは「光と色の見え方の関係」について焦点を絞ろうと思う。ヒトが色を認識する仕組みについては、拙著の「小学生や中学生に語る『光と色の科学』」の中²⁾で簡単に言及しているが、ここではその内容を踏まえつつ、「色の科学」を中心にして、「光と色の見え方の関係」について解説する。

「光と色の見え方の関係」の学習で使用する教材を表1にまとめて示す。この表には、各教材に対して、学習項目、使用器材、および学習内容を示している。ここで、使用器材の欄にある「虹ボード^{3,4)}」は、発光ダイオードを波長順に基盤上に並べて製作した虹のように発光する教材のことである。表1の教材は、「光と色の見え方の関係」の学習で使う順にリストしているが、具体的な使い方については次の節で詳しく解説する。

教材を用いた「光と色の見え方の関係」の解説

「光と色の見え方の関係」を解説するために用意した24枚のスライドを図1に示す。ここで、各スライドの右下隅に示したS1からS24までの英数字はスライド番号である。この節では、スライド番号の順に話を進めて行く中で、表1の教材の使い方を説明しようと思う。以下の文章において、説明の内容に応じて、「である調」と「ですます調」を併用していることを予めおことわりしておく。

表1 「光と色の見え方の関係」の学習で使用する教材

学習項目	使用器材	学習内容
光の観察	レーザーまたは懐中電灯	光が直進する様子を観察
分光	プリズム	可視光を周波数順に並べると虹になることを観察
加法混色	プリズム、ポリカーボネート鏡	虹を曲面鏡で反射して混合することにより白色光ができることを観察
光と色	虹ボード ^a	発光ダイオードを用いて光の波長と色の関係を観察
加法混色	光の3原色観察器 ^b	赤、緑、青の3色の光の混合により任意の色が作り出せることを観察
加法混色	ノートパソコン、ルーペ	ディスプレイが3色の光で表現されることを観察
吸収分光	虹ボード ^a 、色付セロファン	物質による光の吸収の観察（可視吸収スペクトルの観察）
補色残像	パワーポイントが使えるノートパソコン	補色残像の観察

a 虹ボードはボード上に発光ダイオードを波長順に並べたもの。文献3および4を参照。

b 中村理科工業株式会社（現ナリカ）製「光の3原色観察器」。

A. 可視光と光

最初に、図1のS1からS4までの4枚のスライドを使って、可視光が光の一種であることと、虹の中の一つ一つの色が可視光の種類となっていることを解説する。ここでは、表1教材として、レーザー、プリズム、ポリカーボネート鏡、および虹ボード^{3,4)}を用いる。各スライドの具体的な解説を以下に示す。

S1 光は電磁波とも呼ばれ、電気と磁気の波からできています。その具体的な構造はこの図のように光の進行方向に対して、+と-の電場が交互に変わるような電気の波と、N極とS極の磁場が交互に変わるような磁気の波からできています。（教材のレーザー光をスクリーンかあるいは壁に向けて発射して）このレーザーの光も、電気の波と磁気の波からできています。

S2 光は波の一種ですから、一般の波のように周波数や波長で特徴付けられます。光には目に見える光もありますが、見えない光もあります。ヒトの目で

見える光は可視光と呼び、周波数にして 400 兆ヘルツから 800 兆ヘルツまでの光がそれに相当し、目には周波数の低い方から順に赤、橙、黄、緑、青、藍、紫の光として認識されます。ここで、ヘルツとは 1 秒間に光が何回+-の電場を変えるかという周波数の単位です。可視光より周波数が小さな光は目に見えなくなり、赤の外にある光ということで赤外線と呼ばれる主に発熱体から放射される光になります。一方、可視光より周波数が大きな光も目に見えなくなり、紫の外にある光ということで、紫外線と呼ばれる危険な光になります。家庭の 100 ボルトの電気は、1 秒間に 60 回の割合で+-の電場を変えているので、60 ヘルツの光と考えることもできます。一方、ヒトの目の感度が一番良い光は、1 秒間に 550 兆回も+-を変える緑の光です。皆さんは 550 兆という数の大きさを想像できますか？しかし、550 兆という数は小学生も知っておかねばなりません。というのは、日本の借金が 550 兆円を大きく超えているからです。日本の借金⁵⁾は 2000 年には 500 兆という目でも良く見える範囲に入っていましたが、2011 年には 1000 兆になり、目に見えない紫外線の中でも最も危険な光の領域に入ってしまった。

一方、光を波長で見るとは、380 ナノメートルから 750 ナノメートルの波長の光が可視光になります。ここで、ナノメートルは長さの単位で、1 メートルの 10 億分の 1 が 1 ナノメートルです。可視光を色で表わす場合、波長の大きい方から順に赤、橙、黄、緑、青、藍、紫の光になります。先に述べた周波数とここで述べた波長は光速を挟んで逆数の関係⁶⁾になっています。

S3 光を周波数の順に分解することを分光と言い、光を分光して得られたものをスペクトルと言います。写真 a のプリズムを使うと太陽光（自然光）を分光することができます。プリズムはこの写真に示すように三角柱のガラスの塊でできていますが、これを太陽にかざすと太陽に背を向けた位置に写真 b に示すような明るい虹⁷⁾を作ることができます。この虹（スペクトル）を観察すると、太陽光がどんな光から構成されているかがわかります。虹は七色と言われていますが、実際の虹は赤から黄へ、黄から緑へ、緑から青へと連続的に色が移り変わる光として観察されます。

また、ポリカーボネート鏡⁸⁾を使うと、虹の七色の光を混ぜ合わせて再び白

A. 可視光と光

光とは何か？

光 = 電磁波 = 電気と磁気の波

光は電気と磁気の波である！

S1

光の種類

可視光の種類は色で区別できる！

空間的に見た光 λ (波長)

時間的に見た光 T (周期), f (周波数), $\lambda = 1/f$

S2

太陽や白色光をプリズムで分光する

太陽光 (白色光) → プリズム → 虹

光の屈折で光が分けられる

分光: 光を周波数の順に分けること

プリズムで分光できる！

S3

可視光の観察 (発光ダイオード)

発光ダイオード(LED)

+側から一側に電流を流すとほぼ純粋な色の光を発光する。

可視光

S4

B. 加法混色と色が見えるしくみ

光の3原色観察器を用いた光の混合実験

この画面の色を見る

回折フィルター

青スイッチ
緑スイッチ
赤スイッチ

回折フィルターを用いるとどの色の光が混ざっているかわかる

S5

実験: 光を混ぜてみよう

2つの色の混合

	赤	緑	青
赤		?	?
緑	■		?
青	■	■	

3つの色の 赤・緑・青の3つの色を混ぜると・・・ (?) 色になる。

S6

図1 「光と色見え方の関係」を解説するためのスライド (その1)

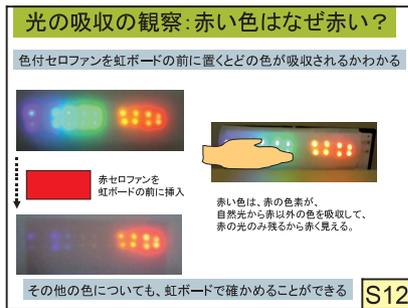
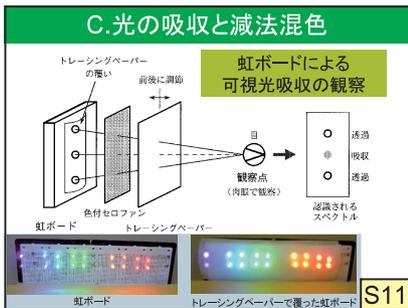
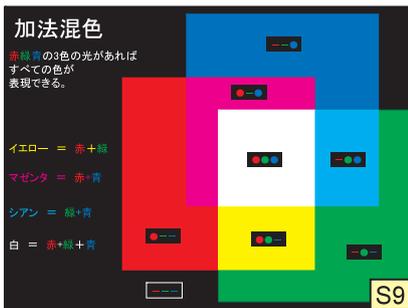
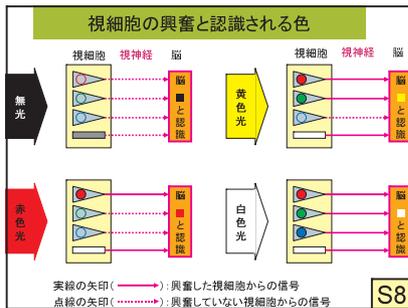
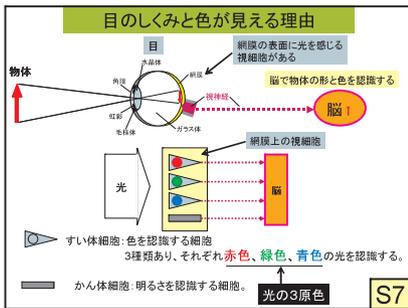


図1 「光と色の見え方の関係」を解説するためのスライド (その2)

絵具を混ぜると どんな色になるか？

入射光 反射光 透過光

イエロー 赤 マゼンタ

S13

減法混色

イエロー、マゼンタ、シアンの3色の絵具があればすべての色が表現できる。

色の3原色

- イエロー
- マゼンタ
- シアン

1: 吸収する色

S14

D. 加法混色と減法混色のまとめ

加法混色

減法混色

S15

まとめ

光にはいろいろな種類がある。目に見える光もあるが、目に見えない光もある。目に見える光を周波数順に並べると赤橙黄緑青藍紫となる。赤より周波数の小さな光は赤外線と呼ばれ、紫より周波数の大きな光は紫外線と呼ばれる。

ヒトの目には赤、緑、青の光を感じる3種類の細胞が存在する。ヒトは、それらの細胞が受ける光の量に応じていろいろな色を感じる。

加法混色(光の3原色)

赤、緑、青の光(ライト)ですべての色が表現できる。

減法混色(色の3原色)

イエロー、マゼンタ、シアンの絵具ですべての色が表現できる。

S16

E. 色の見え方に関係した残像実験

実験: 不思議な青い鳥

次のスライドではこの赤い鳥の目をキョロキョロせずに、顔を動かさずに真っすぐ見つめて下さい。

次のスライドの赤い鳥

次のスライドではこの赤い鳥を拡大したものを映します。その赤い鳥を10秒間見つめると、その後白い画面を出したとき青い鳥が見えてきます。

S17

S18

図1 「光と色の見え方の関係」を解説するためのスライド (その3)

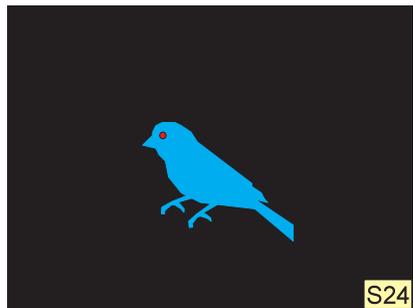
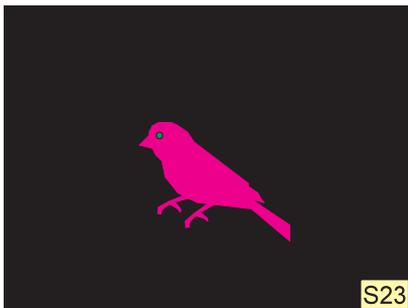
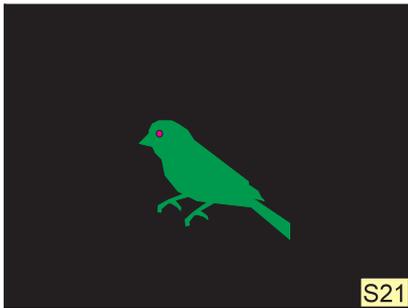
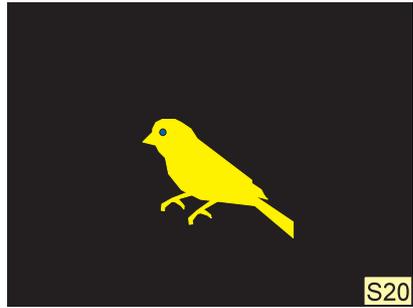
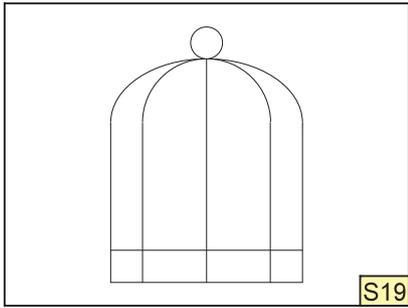


図1 「光と色の見え方の関係」を解説するためのスライド（その4）

色光に戻すことができます。具体的には、最初にプリズムで分光した虹をポリカーボネート鏡で反射して、白または黒の洋紙の上に投影します。続いて、ポリカーボネート鏡を円筒形に曲げて行くと、洋紙上の虹が縮んで七色の光が混じり合っ、写真cに示すような強い白色光（自然光）⁹⁾が出現します。

即ち、これらの実験のうち、一つ目の実験で太陽光を分光すると虹ができることを示し、二つ目の実験でその虹から元の太陽光を合成できることを示しました。この2つの実験を同時に行うことによって、太陽光（自然光あるいは可視光）が虹色の光を構成要素として持つことを確認したことになります。

S4 発光ダイオード（LED）は右上の写真にあるような形をした電子部品で、脚の長い方にプラスの電極、短い方にマイナスの電極を付けて10ミリアンペア程度の電流を流すと明るく発光させることができます。発光ダイオードの発光効率、豆電球などの白熱電球に比べて非常に高く、省エネであることから、これを使った照明が普及し始めています。この発光ダイオードのもう一つの特徴は、発光波長帯域が狭いので、ほぼ純粋な色で発光しているということです。左上の写真は、異なる発光波長を持つ発光ダイオードを波長順に並べた教材の虹ボード^{3,4)}で、点灯すると、個々の発光ダイオードが特有の色で発光しているのが観察できます。この写真からわかる通り、虹ボードは、純粋な光（単一の波長を持つ光）が目に見えるイメージを確認する教材として利用できます。下の写真は虹ボードの表面をトレーシングペーパーで覆ったもので、発光がぼかされて虹ボードが虹らしく光って見える様子を示したものです。

B. 加法混色と色が見えるしくみ

図1のS5からS10までの6枚のスライドを使って加法混色と色が見えるしくみについて解説¹⁰⁾する。ここでの内容が理解できれば、「純粋な光がもたらす色（虹の七色）」と「身の回りあるたくさん色」との関係が説明できるようになる。表1の教材としては、光の3原色観察器¹¹⁾、ノートパソコン、およびルーペを用いる。各スライドの具体的な解説は以下の通りである。

S5 このスライドで、光の3原色観察器¹¹⁾の使い方について説明します。この教材は左の写真に示すように赤、緑、および青の3色の光を別々に点灯させ

る3つのスイッチとそれぞれの光の強度をコントロールする3つのつまみ（ノブ）と観察窓からできています。標準の実験ではそれぞれの光の強度を最大にして、原色を見るときはスイッチを1つだけオンにし、2色を混合するときには2つのスイッチをオンにし、3色全部を混合するときには3つのスイッチをオンにして観察します。この実験から、赤・緑・青の3種類の光を用いると、赤、緑、青、黄（イエロー）、シアン、マゼンタ、および白色の光を観察できることがわかります。さらに、光の強度をコントロールするノブを回すことにより、赤・緑・青の3種類の光から全ての色の光を作り出せることを確認できます。このように、光を混ぜ合わせて異なる彩色の光を作り出すことを加法混色と言い、赤、緑、および青の3色を光の3原色と言います。

加法混色で合成された光は、右の写真のように回折フィルターを通して観察することにより、赤・緑・青の3つの成分に分解（分光）して混色状況を確認することができます。

S6 このスライドに、光の3原色観察器¹¹⁾を使った実験のワークシートを示します。赤、緑、および青の光の合成で観察した色をワークシートの「？」の部分に記入することにより、加法混色について学習できます。

S7 赤、緑、および青の3色の光だけで全ての色の光が表現できる理由を理解するためには、ヒトの目の構造と、ヒトが色を認識する仕組みを理解しておかなければなりません。ヒトの目は、物体から出る光（可視光）を検出する器官です。ここで、物体から出る光には、物体自身が光って出る光の場合と、光が物体に当たって反射して出てくる光の場合がありますが、目にとってはどちらも同じ光として検出されます。ヒトの目は上図のようにレンズの役目をする水晶体と、たくさんの視細胞で敷き詰められた表面を持つ網膜からできていて、それぞれの視細胞は視神経を通して脳につながっています。ヒトが物体を見るとき、物体から出た光は水晶体に入って屈折して網膜上に映写されて物体の実像を結びます。物体の存在が確認できるのは、物体が写影されたところに位置する視細胞が物体の光を検出して信号を発し、その信号が視神経を通して脳に伝わり脳で物体として認識されるからです。視細胞には、明るさを検出する桿体細胞と色を検出する錐体細胞の2種類があります。色を検出する錐体細胞は

3種類あり、それぞれ、赤、緑、および青の光を検出して信号を出し、その信号が脳で処理されて色として認識されます。錐体細胞が3種類しかないということは、赤・緑・青の3色の光（光の3原色）があれば、全ての色が表現できることを意味し、実際に光の3原色観察器¹¹⁾を用いてこのことを確かめることができます。

網膜上の視細胞の数は、眼球1個当たり、桿体細胞が約1億個、錐体細胞が約650万個¹²⁾です。ここでは下図に示すようなモデル化した一組の赤・緑・青の錐体細胞と桿体細胞のユニットを使って色の見えるしくみを解説します。このモデルでは、赤、緑、または青を含む光が錐体細胞に入射するとその色に対応する錐体細胞が光を検出して励起され、その興奮が視神経を通過して脳に伝えられて色の認識となります。一方、桿体細胞は、光を検出したときは、光の色にかかわらず、明（白）の認識となり、光が無いときは暗（黒）の認識となります。

S8 このスライドでは色が認識されるしくみを4つの場合に分けて考えますが、いずれの場合も、目に入って来た光が視細胞のユニットのどの錐体細胞で検出されるかを検討し、それが脳でどんな色として認識されるかを考察します。

光が無いときはどの錐体細胞も興奮しないので、脳は黒（暗）と認識します。赤の光が来たときは赤の錐体細胞のみが興奮して脳では赤と認識します。黄（イエロー）の光が来たときは赤と緑の錐体細胞が同時に興奮しますが、その信号が脳に伝わると、脳は黄（イエロー）と認識します。一方、白色光が来たときは、白は色々な光を含んでいるので、赤・緑・青の全ての錐体細胞が興奮しますが、その場合脳は白と認識することになります。その他の色の光も、それぞれの錐体細胞の興奮の度合いに応じて、それなりの色として認識されることになります。

S9 このスライドで加法混色について説明します。加法混色では図のように、光の3原色の赤、緑、および青の光を最初に配置します。光の3原色観察器¹¹⁾の実験結果からもわかる通り、2色の光が混ざった領域では、赤と緑の光でイエロー¹³⁾になり、緑と青の光でシアンになり、青と赤の光でマゼンタになりま

す。更に、赤、緑、青の3色の光が均等に混ざると白になります。その他の色の光は、赤、緑、青の光の強度を加減して混合することにより生み出されます。

このスライドでは、それぞれの色の配色領域内に、それぞれの色がもたらす錐体細胞の興奮状態を「色」と「一」を用いた記号（以後、視細胞ユニット記号¹⁴⁾）で示しています。例えば、白色の領域は**赤緑青**という視細胞ユニット記号を用いて記し、白色が3種類の錐体細胞の全てを興奮させる色であることを示します。黒色の領域は**---**と記し、黒色がどの錐体細胞も興奮させない色であることを示します。ここで、長方形の枠の中にある3つの「色」または「一」は、左から順に赤、緑、および青の錐体細胞が興奮状態にあるかまたは静止状態にあるかを示しています。光の3原色を視細胞ユニット記号で表現すると、赤の光は赤の錐体細胞だけを興奮させる色なので**赤---**と表現され、緑の光は緑の錐体細胞だけを興奮させる色なので**一緑一**と表現され、青の光は青の錐体細胞だけを興奮させる色なので**一一青**と表現されます。2色の光が混合した領域では、イエローが赤と緑の錐体細胞を興奮させる色なので**赤緑一**と表現され、シアンが緑と青の錐体細胞を興奮させる色なので**一緑青**と表現され、マゼンタが赤と青の錐体細胞を興奮させる色なので**赤一青**と表現されます。

S10 パソコンやテレビの画面は加法混色を観察する良い教材になります。パソコンやテレビの画面をルーペで観察すると、画面上に表現されるどんな色彩も赤と緑と青の3色だけで表現されていることが確認できます。

C. 光の吸収と減法混色

絵具やペンキなどの混色を減法混色と言うが、ここでは特に、減法混色の3原色がイエロー、シアン、およびマゼンタになる理由について説明する。使用するスライドは図1のS11からS14までの4枚で、可視吸収スペクトルの原理を用いると減法混色の意味が理解できることを示す。表1の教材としては、虹ボード^{3,4)}と色付セロファンを用いる。各スライドの具体的な解説は以下の通りである。

S11 減法混色の3原色がイエロー、シアン、およびマゼンタになることを説

明するには、物質の色と可視吸収スペクトルの関係について理解しておく必要があります。可視吸収スペクトルは物質がどんな可視光を吸収するかを示したのですが、このスペクトルは虹ボード^{3,4)}を用いると肉眼で確認できます。

このスライドは、色付セロファンがどんな可視吸収スペクトルを与えるかを虹ボードで観察する方法^{3,4)}を示しています。やり方は、虹ボードから出る光(左下の写真)をこの図のように2枚のトレーシングペーパーを使ってぼかして虹らしくなるように調節した状態で、色付セロファンを挿入して虹の変化を見るだけで良いのです。右下の写真は、虹ボードを1枚目のトレーシングペーパーで覆ったときの様子を示しています。色付セロファンの可視吸収スペクトル観察結果については次のスライドに示します。

S12 このスライドで、赤色をした物がなぜ赤く見えるかを、赤の色付セロファン(赤セロファン)の可視吸収スペクトルを使って説明します。

左上の写真は、トレーシングペーパーを使ってきれいな虹が肉眼で見えるように調節したときの虹ボードを示しています。その状態で、赤セロファンを挿入すると左下の写真のようなスペクトルが得られ、赤の光だけが残ってその他の光が吸収されて消えることが確認できます。この実験から、赤セロファンが赤いのは、赤セロファンの中にある色素が赤以外の可視光を吸収して赤のみ残るから赤く見えることがわかります。その他の色についても、色と光の吸収の関係を考察すれば発色の理由が理解できます。

S13 このスライドでイエローとマゼンタの絵具¹⁵⁾を混ぜると赤になる理由について説明します。

前のスライドの議論を用いると、イエローの絵具は、イエローの色素が青の光だけを吸収して赤と緑の光はそのまま反射または透過するので、赤と緑の光が目に入るからイエローに見えるということになります。同様に、マゼンタの絵具は、マゼンタの色素が緑の光だけを吸収して赤と青の光に対しては影響を与えないので、赤と青の光が目に入るからマゼンタに見えるということになります。それでは、イエローとマゼンタの絵具を混ぜるとどうなるのでしょうか？イエローとマゼンタの絵具を混ぜてできた混合物は、青の光を吸収する色素と緑の光を吸収する色素を合わせ持つことから、赤の光のみが影響を受けず

に残るので、赤に見えるということになります。

この議論は、S9のスライドで定義した視細胞ユニット記号を用いて議論するとさらにわかり易くなります。吸収される光を矢印「↓」で示すと、イエローの絵具は青の光だけを吸収する色素を持つから、**赤緑↓**と表現されます。マゼンタの絵具は緑の光だけを吸収する色素を持つから、**赤↓青**と表現されます。イエローとマゼンタの絵具を混ぜた絵具は緑と青の光を吸収する色素を持つから、**赤↓↓**と表現されるので赤色になります。その他の絵具の混色も同じように考えることができます。

S14 絵具に関する混色のことを減法混色と言います。このスライドで、減法混色の3原色がイエロー、マゼンタ、およびシアンであることを説明します。

イエローの絵具は青の光だけを吸収するから、**赤緑↓**と表現されます。マゼンタの絵具は緑の光だけを吸収するから、**赤↓青**と表現されます。シアンの絵具は緑の光だけを吸収するから、**↓緑青**と表現されます。

イエローの絵具とマゼンタの絵具を混ぜた物は、緑と青の光を吸収する色素を持つから、**赤↓↓**と表現されるので赤色になります。マゼンタとシアンの絵具を混ぜた物は、緑と赤の光を吸収する色素を持つから、**↓↓青**と表現されるので青色になります。シアンとイエローの絵具を混ぜた物は、赤と青の光を吸収する色素を持つから、**↓緑↓**と表現されるので緑色になります。

イエローとマゼンタとシアンの3色の絵具を混ぜた物は青と緑と赤の光を吸収する色素を持つから、**↓↓↓**と表現されるので黒色になります。

これまでの議論より、イエローとマゼンタとシアンの3色の絵具があれば全ての色が表現できることが推論でき、それゆえこの3色を減法混色の3原色といえます。

D. 加法混色と減法混色のまとめ

この節では、図1のS15とS16の2枚のスライドを使って、加法混色と減法混色のまとめを行う。

S15 このスライドに加法混色と減法混色の図をまとめて示します。加法混色は赤と緑と青の3色の光を重ね合わせて混合する色の表現法です。加法混色は

光の混色なので、色を重ねれば重ねるほど明るくなり色が薄くなって、最終的には白色に近づいていきます。一方、減法混色はイエローとマゼンタとシアン
の3色の絵具を混ぜ合わせて混合する色の表現法です。減法混色は光を吸収して発色する絵具の混色なので、色を重ねれば重ねるほど暗くなり色が濃くなって、最終的には黒色に近づいていきます。

このスライドを見ると加法混色と減法混色が補色の関係になっていることがわかります。一般に、ある色の視細胞ユニット記号の中の「一」と「色」を置き換えてできる視細胞ユニット記号に対応する色は、ある色の補色と言います。具体的には、赤は「赤一一」であるから、赤の補色は、「一緑青」となり、シアンになります。また、緑は「一緑一」であるから、緑の補色は、「赤一青」となり、マゼンタになります。同様にして、青は「一一青」であるから、青の補色は、「赤緑一」となり、イエローになります。このスライドにおいて、左図の視細胞ユニット記号の中の「一」を「●」に置き換え、「●」を「↓」に置き換えると右図になります。このことは、左図（加法混色の図）と右図（減法混色の図）が補色の関係になっていることを示しています。

S16 このスライドでこれまでの議論のまとめをします。

最初に可視光の種類について述べました。可視光を周波数の順に並べると赤・橙・黄・緑・青・藍・紫の光になります。続いて、ヒトの目には、赤、緑、および青の光を感じる3種類の視細胞（錐体細胞）があり、この細胞が光を受けて色を認識していることを述べました。そして、最後に、錐体細胞の種類が3種類であるからこそ、赤、緑、および青の3色の光で全ての色が表現できることを示し、イエロー、マゼンタ、およびシアンの3色の絵具で全ての色が表現できることを示しました。

E. 色の見え方に関係した残像実験

ここでは、図1のS17からS24までの8枚のスライドを用いて、色の見え方に関係した残像実験について解説する。この実験に用いる表1の教材は、パワーポイントが使えるノートパソコンである。

最初に、S17からS19までの3枚のスライドを使った「不思議な青い鳥」の

残像実験について説明する。この実験はパソコンの画面上か投影したスクリーン上で行う。やり方は、スライド S17 を最初に見せて、「このスライドを含めた 3 枚のスライドを使って『不思議な青い鳥』の実験を行います。次のスライドで、この『赤い鳥』を拡大したものを映しますが、その赤い鳥をこの写真の女性のように視点をそらさずに 10 秒間見つめてください。その後、私が『はい』と声をかけると、『青い鳥』が現れます。」と案内する。続いて、S18 のスライドを見せて、赤い鳥の目を 10 秒間、顔を動かさずにじっと見つめるように指導する。10 秒間の間を持たすために、ゆっくりカウントダウンする方法がお勧めである。カウントダウンでゼロになったときにクリックして次の S19 のスライドを見せる。このスライドが映し出されると、鳥かごの中に「青い鳥（正しくはシアン色の鳥）」の残像¹⁶⁾が観察できる。

この実験で残像が見える理由を視細胞ユニット記号を用いて説明する。赤い鳥を見ると視細胞は「赤—」となり、赤の錐体細胞が使われて濃度（感度）が低下するので、その状態で白い画面を見ると、赤い鳥を検出した場所で相対的に「—緑青」の量が増えた形になり、シアン色の鳥（青い鳥）が現れるということになる。

この説明を一般化して、残像が補色で現れることを説明しよう。ある像を見つめ続けたとき、視細胞ユニット記号で「色」になったところは感度が低下するので、白い画面を見るときの残像には「—」が相対的に増え、視細胞ユニット記号で「—」となったところは感度が低下していないので、白い画面を見るときの残像では「色」が増える。このことは残像が元の像の補色として現れることを示している。このようにしてできる残像は補色残像と呼ばれる。

S20 から S24 までの 5 枚のスライドには異なる色の鳥を用意しているが、それぞれのスライドを 10 秒間投影した直後に S19 のスライドを投影すると補色残像が現れる。このように、色々な色の鳥を準備したのは、「不思議な青い鳥」の実験でスライド S18 の残像を見た児童が「水色（シアン）に見える」と言ったからである。本当の青い鳥を見るためには、スライド S20 のようなイエローの鳥を使う必要がある。この場合、イエローは「赤緑—」となり、赤と緑の錐体細胞が使われて感度が低下するので、その状態で白い画面を見ると、相

対的に「青」の量が増えた形になり、青い鳥が現れるということになる。

その他の色のスライドを使うと違う色の残像が現れる。スライド S21 の緑の鳥からは、マゼンタ色の残像が現れ、スライド S22 の青の鳥からはイエロー色の残像が現れ、スライド S23 のマゼンタの鳥からは緑色の残像が現れ、スライド S24 のシアン鳥からは赤色の残像が現れる。

この残像実験は、画面の切り替えを一瞬のうちに行って残像効果を容易に確認できるようにしたことがポイントで、個人で行う確認実験や多数数を前にした演示実験に向いている。「不思議な青い鳥」の実験のネーミングはメートルリンクの青い鳥¹⁷⁾を下敷きになっているが、元の像に赤い鳥を使うか、あるいはイエローの鳥を使うかは、残像が見えたときの感じ方により、判断の分かれるところである。

以上、「光と色の見え方の関係」について、A から E までの項目別に、表 1 の教材を用いながら解説した。小学校の児童を対象に、本稿の内容に沿って減法混色のところまで説明して、「イエロー、マゼンタ、シアンの 3 色の水彩絵具があれば全ての色が表現できる」と話したら、ある児童が「白はどうするのか？」と質問した。これに対して、「白は、画用紙の白を使う」と答えると、納得した様子であった。ここで言いたいことは、これまで述べた光と色に関する内容は小学生でも理解できる内容になっているということである。光と色は不思議な魅力を持つにも関わらず、身の回りにあり、各自が自分の感覚で確認できる対象なので、自然科学に対して興味を持つきっかけとなるテーマであることを強調して、この節を終える。

おわりに

本稿は、「加法混色・減法混色と色の見え方について」というサブタイトルで、「シャボン玉の表面が虹色に輝く理由」に関連した教材について解説した。ここでの議論を用いると、色にまつわる現象は、大抵のことは説明できるはずである。シャボン玉が虹色に見える理由については、シャボン玉膜による光の干渉と、干渉の結果として、シャボン玉膜がどのような色に認識されるかを説

明しなければならない。これに関しては、稿を改めて解説する予定である。

謝辞

光の実験にあたって塩野正明教授から有益な助言をいただいた。ここに記して、心から御礼申し上げる。本稿は日本学術振興会科学研究費助成事業、基盤研究C 課題番号[23501037] (研究課題名:「シャボン玉の科学」をテーマにした教材開発、研究代表者:松村敬治、研究分担者:塩野正明)の助成を受けて執筆したものである。

参考文献および注

- 1) 松村敬治「可視分光によるシャボン玉の膜の厚さの測定」西南学院大学人間科学論集 第5巻2号 pp.13-33 (2010).
- 2) 松村敬治「小学生や中学生に語る『光と色の科学』」西南学院大学人間科学論集 第6巻1号 pp.85-106 (2010).
- 3) 松村敬治「私のくふう 発光ダイオードの『虹ボード』を用いた可視スペクトルの演示実験—吸収スペクトルを実感する教材の開発—」化学と教育 第51巻6号 pp.374-375 (2003).
- 4) 松村敬治「『虹ボード』を用いた可視スペクトルを実感する教材 —『虹ボード』の製作から小・中学校の理科教育への応用まで—」西南学院大学人間科学論集 第1巻2号 pp.109-139 (2006).
- 5) 財務省の統計一覧表のサイト <http://www.mof.go.jp/jgbs/reference/gbb/data.htm> から。
- 6) 光が伝達する速さ(光速)は光の種類にかかわらず一定である。光速 c は、 $c=30$ 万キロメートル/秒となり、宇宙で最大の速度になる。一方、周波数 ν と波長 λ の間には、 $\lambda\nu=c$ の関係がある。
- 7) プリズムを太陽光の下に置き、プリズムから放射される虹をカーテンなどで暗くした部屋に導くことにより鮮やかな虹をつくることができる。太陽光が使えないときは、液晶プロジェクターにプリズムかざすと淡い色の虹がスクリーン上にできるので、これを代用することもできる。
- 8) ポリカーボネート鏡はホームセンターなどで入手できる。ポリカーボネート鏡の自作法に関しては、「中島哲人『曲がるポリカーボネート鏡を作る』化学と教育 43巻9号 pp.584-585 (1995)」に詳しい。
- 9) この実験の面白いところは、色が一瞬にして消えて無くなったように感じることであろう。ヒトの先入観として、「白い物は汚れるが、汚れた物は完璧な白には戻らな

い」という洗濯物を扱うときのイメージが染み付いているので、この実験で出現する完璧な白色光は意外なものとなり、興味と感動をもたらす。

このような白色光を作る方法として、虹を使わずに、発光ダイオードなどで作った赤と緑と青の光を照射して混ぜ合わせる方法がある。しかし、この方法はそれぞれの光の強度を上手く調整しないと、白色にならずに微妙に色が残ってしまうので結構難しく、実験後の後味が今一になることが多い。これに対して、白色光を分光した虹をポリカーボネート鏡で反射して白色光を再現する方法は、元の白色光になることと、虹の光よりも強い白色光が出現することが保証されるのでお勧めである。

- 10) 色覚に関して、イギリスの物理学者のトマス・ヤング (1773 年-1829 年) が考えた説を、50 年の時を経て、ドイツの生理学者・物理学者のヘルマン・フォン・ヘルムホルツ (1821 年-1894 年) が発展させたものが、ヤング-ヘルムホルツの三色説である。ここでは、この説を基にして、色の見えるしくみについて解説する。
- 11) 中村理科工業株式会社 (現: 株式会社 ナリカ) 製の「光の 3 原色観察器」
- 12) 目の構造はデジタルカメラの構造と良く似ている。錐体細胞が 650 万個あるということは、目が 6.5 メガピクセルのデジタルカメラに相当することを意味する。この画素数は、一昔前は十分大きかったが、今はむしろ小さな部類になっている。にもかかわらずカメラより目の方が格段に優れているのは、脳がフォーカシングと記憶を駆使して映像を作り出しているからである。
- 13) ここ以降、光の 3 原色のうち、2 色の光を混ぜてできた色をカタカナで表記して区別する。したがって、「黄」の代わりに「イエロー」と表記する。
- 14) 「視細胞ユニット記号」は本稿だけで用いる造語。視細胞ユニット記号は、ある色の光を見たとき、3 種類の錐体細胞のそれぞれがどのような興奮状態になっているかを 1 つの記号で示したものである。例えば、白色光 (白色) を見たときは **赤緑青** と記し、光が無いとき (黒色のとき) は **---** と記す。即ち、錐体細胞が興奮しているときは「色」で示し、興奮していないときは「-」で示すことにする。ただし、図 1 のスライド S9 の視細胞ユニット記号は「色」の代わりに、色付の丸印「●」を用いて表現していることを留意する。
- 15) ここでは、水彩絵具、油彩絵具、クレヨン、ペンキなど彩色に用いる材料を総称して絵具という言葉を用いる。
- 16) この実験は、「有馬朗人総監修、大山光晴監修『学研キットボックス 夢中になれる!! 光の 3 原色実験』学習研究社 (2004).」の p.29 の紙上実験をパワーポイントのスライド上の実験にアレンジしたものである。パワーポイントを用いると画面の切り替えが好きなタイミングで一瞬に行えるので、紙上実験よりも容易に残像を体験できる。
- 17) メーテルリンク著、堀口大學訳『青い鳥 (新潮文庫メ-3-1)』新潮社 (1960)。