

プロジェクターを用いた加法混色実験と減法混色実験

渋谷 優斗*・大倉 遥華**・小川 佳宏***

(令和3年8月23日受付；令和3年10月29日受理)

要 旨

プロジェクターから赤、青、緑の三色を出力し、これらの光を合わせると白色光になることを示す加法混色実験を行った。この実験方法を用いることで、従来の方法よりも手軽に加法混色実験を行うことができる。また、プロジェクターから赤、緑、青、シアン、マゼンタ、イエローの光を出力し、赤色、緑色、青色のパステルに照射する実験を行った。照射する光の色と明るく見えるパステルの組み合わせから、減法混色による色の見え方を説明する。これらの実験から光と色料の三原色が異なることを示すことができる。

KEY WORDS

光の三原色，加法混色，減法混色，プロジェクター

1 はじめに

私たちが物を見るときには、目によって光を感知し、視覚によって情報を得ている。視覚から得られる情報は、形、色、明暗など様々であり、それらの情報は私たちが生活を送るうえで極めて重要なものである。日常的に行っている「見る」という行為と「光」との間には私たちが光によって物を見ている以上、切っても切れない密接な関係がある。

中学校で物の見え方について扱うのは、第一分野「身近な物理現象」の冒頭であり、生徒が中学校で初めて触れる物理分野である。そのため、生徒の物理学に対する興味を引き出すことが重要な単元だといえる。文部科学省「中学校学習指導要領解説理科編」⁽¹⁾でこの単元の内容の取扱いを見ると「白色光はプリズムなどによっていろいろな色の光に分かれることにも触れること。」という内容が記載されている。また、教科書⁽²⁾においてこの単元で最初に記載されている内容は、物が見えるときは光源から出た光が直接目に届いている場合と、光源から出た光が物体の表面で反射して目に届いている場合の2つがあるという説明である。

本教材は、加法混色実験によって白色光が作れることを示すことで、白色光がいろいろな光に分かれることを説明するものである。加法混色実験は、科学館等で演目として行われており、生徒の興味関心を引き出しやすい題材であるといえる。また、演示方法の工夫によって光源の色の見え方と吸収による色の見え方の違いを示すことができるため、教科書に記載されている物の見え方への理解を深めることができる。

教材としての加法混色実験の例には、長谷川⁽³⁾や大坂⁽⁴⁾の研究があるが、これらの実験には、LEDと可変抵抗を組み合わせた回路を自作する必要や、ランプに赤色、緑色、青色のゼラチンを張り付ける必要があり、実験準備に手間と時間がかかってしまう。実験教材には市販のものもあるが、生徒に配布するとなるとコストがかかってしまう。

本教材は、パソコンとプロジェクターを用いて光の加法混色を行えるようにしたものであるため、実験のための道具を製作する手間がかからない。また、小野⁽⁵⁾の研究では三台のプロジェクターが必要であったが、本論文に示した方法によって一台のプロジェクターで加法混色実験を行うことが可能である。本教材は、光源としてプロジェクターを利用することにより、パソコン上で容易に光の色や強度を調整でき、かつ身近なテレビ画面やパソコン画面に加法混色が活用されていることを体感することができるものである。

本教材は色料の三原色についても触れることができるため、その演示方法を示した。色料の三原色は、プリンターの普及によってよく目にするようになったため、生徒が身近に利用されていることを実感しやすいと考える。中学校理科では発展的な内容となってしまうが、中学校第一学年の美術にて色料の三原色や色相環などを取り扱うため⁽⁶⁾、教科横断的な指導によって身近なところで理科の考え方が活用されていることを生徒が感じるきっかけになると考える。

*上越教育大学（修士課程）

**上越教育大学（初等教育教員養成課程）

***自然・生活教育学系

2 光の三原色と色料の三原色について⁽⁷⁾

光の三原色は、赤、緑、青の三色である。光の三原色は、図1上図のように色の組み合わせによってさまざまな色を表現することができ、私たちの身の回りではテレビ画面や蛍光灯等に利用されている。

なぜ、三色のみで様々な色を表現できるのだろうか。人の網膜には、赤錐体、緑錐体、青錐体という三種類の錐体細胞があり、それぞれ赤色の光、緑色の光、青色の光を中心として幅を持ったスペクトル領域を感知する。したがって、緑と青の錐体細胞が反応すればシアン（C）、赤と青でマゼンタ（M）、赤と緑でイエロー（Y）のように、錐体細胞がそれぞれどの程度反応したかによって人は色を見分けている。これが光の三原色が赤、緑、青である理由である。三種類の錐体細胞がすべて反応しているときは、その色を白と認識する。このように、人が光源を見るとききの混色の法則を加法混色という。なお、このような仕組みであるため、例えば人が黄色と認識する場合には、シャープなスペクトルを持つ黄色の波長の光と、緑から赤にかけて広いスペクトルを持ち黄色に見える光とを区別することができない。また、紫外光が紫色に見えるのは、青錐体の他に赤錐体の第二励起状態が紫外光に反応するためである。

加法混色の三原色である赤、緑、青に対して、色料の三原色はC、M、Yの三色である。色料の三原色を用いても図1下図のように様々な色を表現することが可能である。私たちが普段目にして多くの物質の色は、色料の三原色によって形成されている。色料の三原色に注目すると、赤色の光を吸収する色C、緑色の光を吸収する色M、青色の光を吸収する色Yの三色の組み合わせであることに気が付く。加法混色は、光源を見ているときの色の法則であったが、自ら発光していない物の色を見るときは、光の吸収によって色の見え方を考える減法混色という混色の法則を用いる。

光源がCに見えているときは緑色の光と青色の光（あるいは青と緑の中間の単色光）が出ているということであり、光源でないものがCに見えているときはその物体は赤色を吸収しているということになる。このように、光の三原色による加法混色と色料の三原色による減法混色には表裏一体の関係がある。物体に入射した光は、その表面で何回も吸収と屈折を繰り返した後、ほとんどは後方に散乱し反射光となる。そのため、その物体の色は、反射配置であっても吸収された残りの透過色を見ていることになる。

本論文では、光の色と物の色を区別するために、光の色をそれぞれ白光、赤光、緑光、青光、C光、M光、Y光と表記し、物の色を赤、緑、青、C、M、Yと表記する。

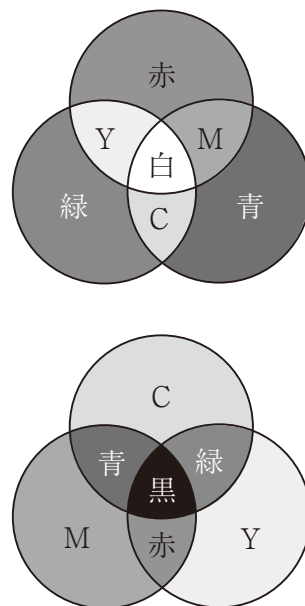


図1 (上) 光の三原色 (下) 色料の三原色

3 色の評価

その色が何色であるかは、観測者の主観によってしまうため、本実験では色を評価するためにApple社製のスマートフォンiPhoneSEのカメラとMicrosoft社製のOSであるWindowsに付属のソフトウェア「Microsoft Paint」を用いてRGBの値を評価した。RGBの値とは、パソコン上で色を表現する際にR（赤）、G（緑）、B（青）がそれぞれどのくらい含まれているかを示す値である。

Microsoft Paintでは色を0から255までのR、G、Bの値の組み合わせで作成することができる。例えば、赤を作るときは「色の編集」機能を使って（R255、G0、B0）というように入力することで赤を作ることができる。

「色の編集」機能はRGBの値による色の評価にも用いることができる。まず、カメラで撮影した画像をコンピュータに転送し、Microsoft Paintで開く。次に、色を知りたい部分に「色の選択」を行い、「色の編集」を開くと、知りたい色の情報が0から255までのRGBの値となって表示されるため、この値を色の評価に用いることができる。本論文では、調べたい色について、五点の平均値をとり、評価値とした。

RGBの値は、厳密に定義された物理量ではないため、本実験では肉眼で見える色の参考として測定した。評価したRGBの値が高ければ、その色は肉眼で明るく見える。

プロジェクターで出力した色の評価値がどのような特性を持っているのか、iPhoneSEのカメラとMicrosoft Paintの「色の編集」、「色の選択」機能を用いた色の評価値がどの程度信頼できるのかを実験によって調べた。プロジェクターはNEC社製のVT660Jを用いて、明るさ等は初期値にし、sRGBモードで出力するように設定した。全ての実験

は、遮光した実験室において行った。

赤光の測定の場合は、まずパソコン上でG、Bの値を0のままにし、Rの値を255、204、153、102、51、0と51ずつ変化させた六種類の光を一つずつプロジェクターでスクリーン上に出力し、カメラで撮影した。次に、撮影した画像を用いて色の評価を行い、図2(a)のようにRGBの評価値と出力値をグラフにプロットした。出力値とは、パソコンで入力したR、G、Bの値である。緑光(0, 255, 0)ではGの出力値を、青光(0, 0, 255)ではBの出力値を、白光(255, 255, 255)ではRGBの出力値をそれぞれ変化させて色の評価を行った。図2に測定結果を示す。

図2(a)では、G、Bは0として出力したにもかかわらず、Rの出力値が255から0までのすべての測定でGとBが検出されている。図2(b)でも同様に0と出力したRとBが検出されており、図2(a)よりも0と入力した色の評価値が高い。特に(0, 255, 0)と出力した際には、評価値130程度のRが測定されている。図2(c)では(0, 0, 255)のときRとGはほとんど検出されなかった。この傾向は(0, 0, 102)まで続いている。図2(d)ではRGBの出力値は等しくしていたにもかかわらず、Gの評価値がR、Bより7%程度高い。

図2(a)-(c)から、プロジェクターを光源とした場合は赤光、緑光、青光のみを出力することが困難であるといえる。特に緑光を出力した際は、Rが多く出力されてしまう。図2(e)に分光器(Ocean Optics社製USB2000)を用いて測定したプロジェクターの出力(赤(255, 0, 0)、緑(0, 255, 0)、青(0, 0, 255))のスペクトルを示す。分光器の受光部をプロジェクターに直接向けて測定した。緑(0, 255, 0)を出力していても、そのスペクトルはブロードであり、青色や赤色の成分を含んでいることがわかる。同様に、iPhoneSEのカメラにもRGBの各波長領域に対応したカラーフィルターが入っており、RGB値を評価している。したがって、プロジェクターとカメラのそれぞれの波長特性によって、RGBの評価値が得られることとなる。また、プロジェクターとカメラのRGB値はガンマ補正がかかっており、光強度に比例するものではない。プロジェクターとカメラのカラーフィルターの特性とガンマ補正の結果として、2(a)-(c)のどのグラフにおいても出力した色の評価値が最も高くなり、出力値と評価値はおおよそ比例関係となる。また、図2(d)から、白光として出力した光は少し緑がかかった色の光だとわかる。これは、出力した白光を肉眼で見たときに抱く印象と同様の結果である。なお、本稿はプロジェクターやカメラの特性を調べ公開することが目的ではないので、装置の特性の記述は以上までとする。

プロジェクターは光源として、ブロードなスペクトルで、出力していない色の光を出力してしまう特性を持っており、iPhoneSEのカメラにより得られるRGB評価値も、光強度に比例するものではない。しかしながら、これらの装置を用いて加法混色実験が十分に行えることを以下に示す。

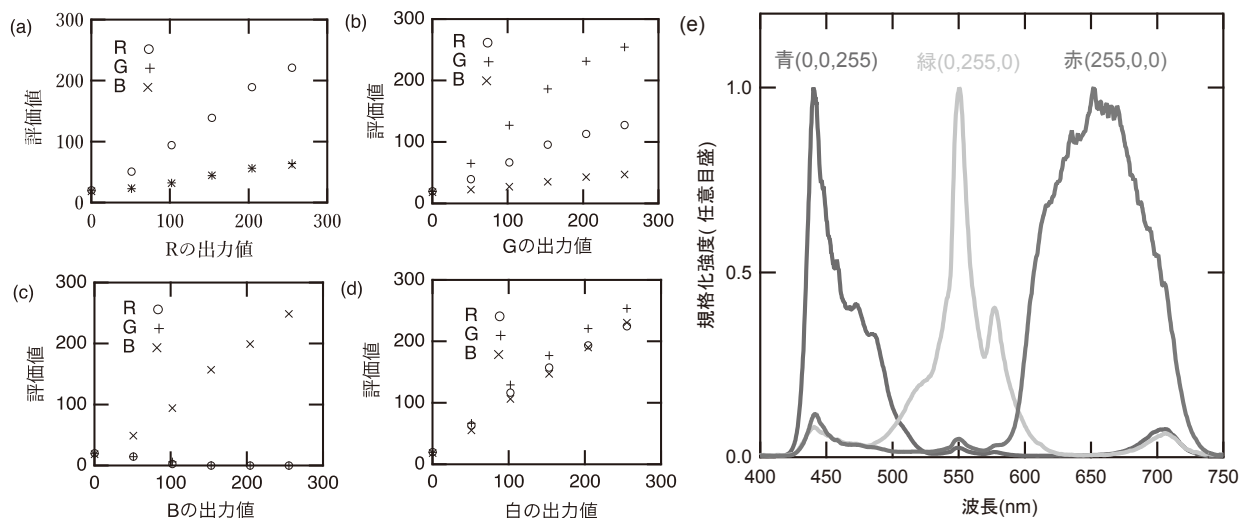


図2 プロジェクターで各色を出力した際の特性。(a) R, (b) G, (c) B, (d) RGBの出力値をそれぞれ変化させた。(e) 赤(255, 0, 0)、緑(0, 255, 0)、青(0, 0, 255)を出力した場合の規格化スペクトル。光強度は2980 Kのハロゲンランプを用いて感度校正を行った。

4 プロジェクターを用いた加法混色実験

本実験はパソコン、プロジェクター、鏡を用いて加法混色実験を行えるようにしたものである。鏡を用いて光を反

射させるため、小学校第3学年での既習内容⁽⁶⁾の復習を行うことができる。また、実験装置としてパソコンとプロジェクターを用いることによって、従来の教材^(3,4)で必要だったLED回路の自作や、ランプにゼラチンを張り付けるといった準備が不要になる。加えて、加法混色の考え方が身近なテレビやパソコンの画面に活用されていることを生徒が体感することができる。

4. 1 実験方法

ペイントソフトで図3(a)のように背面を黒とし、赤(255, 0, 0)、緑(0, 255, 0)、青(0, 0, 255)で塗りつぶした円を一つずつ描く。図3(a)をプロジェクターで出力し、図3(b)のように三枚の鏡を使って赤光、緑光、青光をそれぞれスクリーンへ反射させ、図3(c)のようにスクリーン上で三色の光が重なるよう、鏡の高さや傾きを調整する。三色の光が重なった部分をカメラで撮影し、白光(255, 255, 255)に近づくように、赤光、緑光、青光それぞれのRGBの値を調整する。調整は、撮影した像を用いて色の評価を行った上でRの値が大きければ赤光(255, 0, 0)のRを下げるなどして行う。

本論文では緑光と青光はそのままで赤光のみ(245, 0, 0)と調整して測定を行った。これは、図2(b)より緑光を出力した際にR成分が多く含まれているため、鏡で三色を合成した際に赤みがかかった白光となったためである。三つの光が重なった部分が白光になっているとき、二つの色が重なっている部分がC光、M光、Y光になっているかをカメラを用いて評価した。

本実験ではMicrosoft Paintを用いて色を評価したが、実際に授業等で用いる準備の際は簡易的に三色の光が重なった部分を肉眼で見て白光になるように調整しても良い。その場合は、観測者の主観による色の定義となることに留意する必要がある。

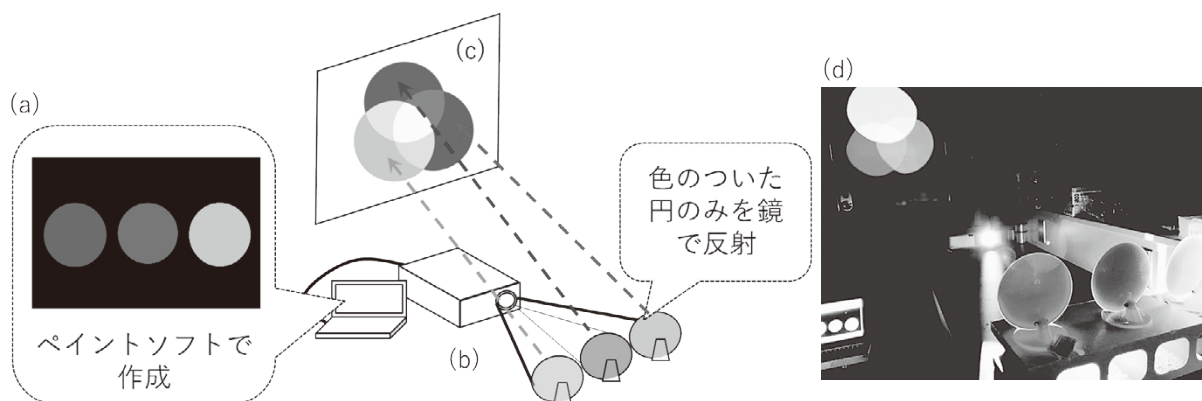


図3 実験配置図。(a) ペイントソフトで作図する図。(b) プロジェクターの出力を3枚の鏡でスクリーンに反射させる。(c) スクリーン上で三色を重ねる。(d) 実際の実験の様子

4. 2 実験結果

三色の光が重なった部分が白光になるようにRGBの値を調整した赤光、緑光、青光を鏡で反射し、合成した白光、C光、M光、Y光を評価した。結果を図4に示す。

図4(a)のRGBの値は一致していることがわかる。本来の白光は(255, 255, 255)であるため、鏡の合成によって作ることができた光は本来の白光よりも暗い光となっている。図4(b)については、G、Bの評価値がRの評価値と比較して倍以上高くなっているため、緑光と青光の混色光であるC光を作ることができたといえる。図4(c)、図4(d)についても、R、BとR、Gの評価値がG、Bの評価値と比較して倍以上高くなっているため、混色光であるM光、Y光をそれぞれ作ることができたといえる。図2からわかるように、例えばプロジェクターで緑光を出力すると多少のRB成分が含まれる。これは、純粋な緑光にRB成分を混ぜ、明度を上げることで見た目をよくしているものと考えられる。プロジェクターによって出力される赤、緑、青の光がブロードな波長を持つ光であるため、鏡で合成した光の色は図4のように明度の高いC光、M光、Y光となる。

これらの結果から、鏡とプロジェクターを用いて三色の光を合わせたときに白光となるように調整を行えば、青光と緑光を合わせてC光、赤光と青光を合わせてM光、赤光と緑光を合わせてY光となることを示すことができるため、光の加法混色実験を行うことができるといえる。ここでは、カメラを用いたRGBの値による評価を行ったが、肉眼で観察するだけであれば、RGBの値を調整しなくても十分に鏡によって合成された白光、C光、M光、Y光を

認識することができる。

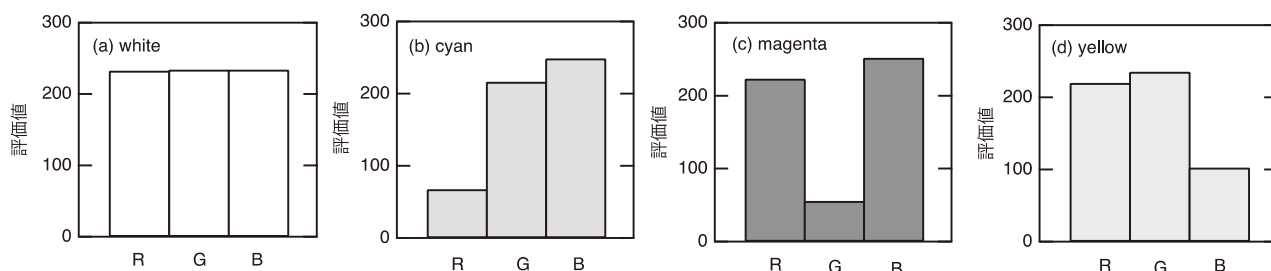


図4 鏡で合成した光の色の評価。(a) 白色 (b) C光 (c) M光 (d) Y光を鏡で合成し、それぞれの色を評価した。

5 プロジェクターを用いた減法混色実験

本実験は、赤、緑、青のパステルとプロジェクターを用いて減法混色による色の見え方を示すものである。パステルを用いた演示実験を記載したのは、黒板上で演示することで生徒全員が見やすく、かつ演示のための準備を簡便にするためである。プロジェクターから光の三原色である赤光、緑光、青光を一色ずつ出力し、赤、緑、青のパステルへ照射したときに、どの色のパステルが明るく見えるのかを示すことによって、減法混色による色の見え方を説明する。また、色料の三原色のC光、M光、Y光を一色ずつ出力し、赤、緑、青のどのパステルが明るく見えるのかを示すことによって、色料の三原色について説明する。

私たちが肉眼で物の色を見ているときは、吸収されなかった光の色である透過光の散乱を見ている。色々な絵の具を混ぜていくと暗い色になるのは、光の三原色をすべて吸収するようになるためである。ある物体がC（シアン）に見える場合を例にあげると、その物体は赤光を吸収しており、透過光は緑光と青光となる。緑光と青光の透過光が散乱し、目に届くことによってその物体はCに見える。これは、緑光と青光が目へ直接届いているためにC光に見える場合とは見えている理由が異なる。本実験は上記のような光が直接目へ届いている場合の色の見え方と透過光の散乱による色の見え方の違いを説明するためのものである。

5.1 実験方法

大創産業より発売されている「パステル18色基本色」の中から、赤、緑、青の炭酸カルシウムパステルを用いて黒板に太い線を描く。色付きチョークでなくパステルを用いたのは、色付きチョークではどの色光を照射しても明るく見えてしまうことや、同じ色の表記でも製造会社によって照射した際の見え方が変わってしまうことがあったためである。本実験では、実験結果を肉眼でも明確に判断できるように、大創産業のパステルを用いた。

図5のように描いたパステルの線に赤光(255, 0, 0)、緑光(0, 255, 0)、青光(0, 0, 255)を照射したときに、何色のパステルのRGBの値が高くなるかを評価した。また、プロジェクターからC光(0, 255, 255)、M光(255, 0, 255)、Y光(255, 255, 0)を出力した際に、何色のパステルのRGBの値が高くなるかを評価した。

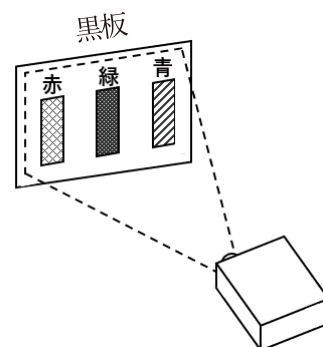


図5 実験配置図

5.2 実験結果

結果を図6に示す。図6(a)–(c)が赤光、緑光、青光を赤、緑、青のパステルに照射したときの各パステルの評価値であり、図6(d)–(f)がC光、M光、Y光を各パステルに照射したときの評価値である。

図6(a)–(c)より、赤光を照射したときには赤パステルのRの評価値が、緑光では緑パステルのGの評価値、青光では青パステルのBの評価値がそれぞれ最も高くなっていることがわかる。また、図6(d)–(f)のグラフより、C光を照射したときには緑パステルのGの評価値と青パステルのBの評価値が高く、M光を当てた際には赤パステルのRと青パステルのBの評価値が、Y光を当てたときには赤パステルのRと緑パステルのGの評価値が高くなっていることがわかる。

図6(a)における緑パステルのRの評価値や、図6(d)における青パステルのGの評価値と赤パステルのBの評価値のように、どのグラフでも共通して、評価値が最も高いパステル以外のパステルの評価値も高くなっている。この要

因は、用いたパステルの色が光の三原色単体の色ではないためだと考えられる。他の要因としては「3色の評価」の項で述べたように、プロジェクターで出力した光に意図していない色が混ざっているためだと考えられる。しかし、本実験において重要なのは、光の色によってどの色のパステルが最も明るく見えるかという点である。実際に我々が本実験を行った条件では、肉眼で十分に最も明るいパステルを確認することができた。

図6 (a) - (c)の結果から、赤光を当てたときは赤パステルが、緑光では緑パステルが、青光では青パステルが最も明るく見えることを示すことができた。これによって、赤パステルは赤光を反射するから赤に見えるのであり、緑パステルは緑光を反射するから緑に見えるといった、吸収されなかった色によって物の色が形成されていることを示すことができる。また、明るく見えない色のパステルはその色の光を吸収していることを説明することができるため、光の三原色である赤、緑、青のパステルを混ぜても光を吸収する暗い色になることを実験結果から説明することができる。実際に光の三原色のパステルを混ぜると黒みがかった茶色になることを確認できる。

図6 (d) - (f)の結果からC光では緑、青パステルが、M光では赤、青パステルが、Y光では赤、緑パステルがそれぞれ明るく見えることを示すことができた。明るく見えたパステルの色の組み合わせから、M（マゼンタ）とY（イエロー）を合わせることで赤、Y（イエロー）とC（シアン）を合わせることで緑、C（シアン）とM（マゼンタ）を合わせることで青となることを説明できる。そのため、C、M、Yという色料の三原色の組み合わせによってさまざまな色を表現できることを示せる。また、暗く見えたパステルの組み合わせから、色料の三原色は赤光、緑光、青光を吸収する色であることを説明することができる。

本実験は、赤、緑、青のパステルにプロジェクターから出力した赤光、緑光、青光、C光、M光、Y光を照射して、色料の三原色について説明するものである。そのため、授業者は加法混色での「CMY」は赤光、緑光、青光の混色によって形成されているものであり、減法混色での「CMY」は赤光、緑光、青光のうち一色を吸収し、他の二色を反射しているために形成されているという、同じ色に見えていても見えている理由が異なることを理解した上で説明を行う必要がある。

また、本実験では、数種類のチョークやパステルを試して、最も良好な結果を得る赤、緑、青のパステルを使用した。実験手法としては、シアン、マゼンタ、イエロー色の試料に赤光、緑光、青光を照射する方が結果を理解しやすい。しかしながら、我々の試した限りでは、純粋なシアン、マゼンタ、イエローの試料を得るのは困難であった。パステルを用いるのではなく、プリンターで各色を印刷して実験に使用しても良いが、純粋な色を印刷するためには色を調整しなければならない。

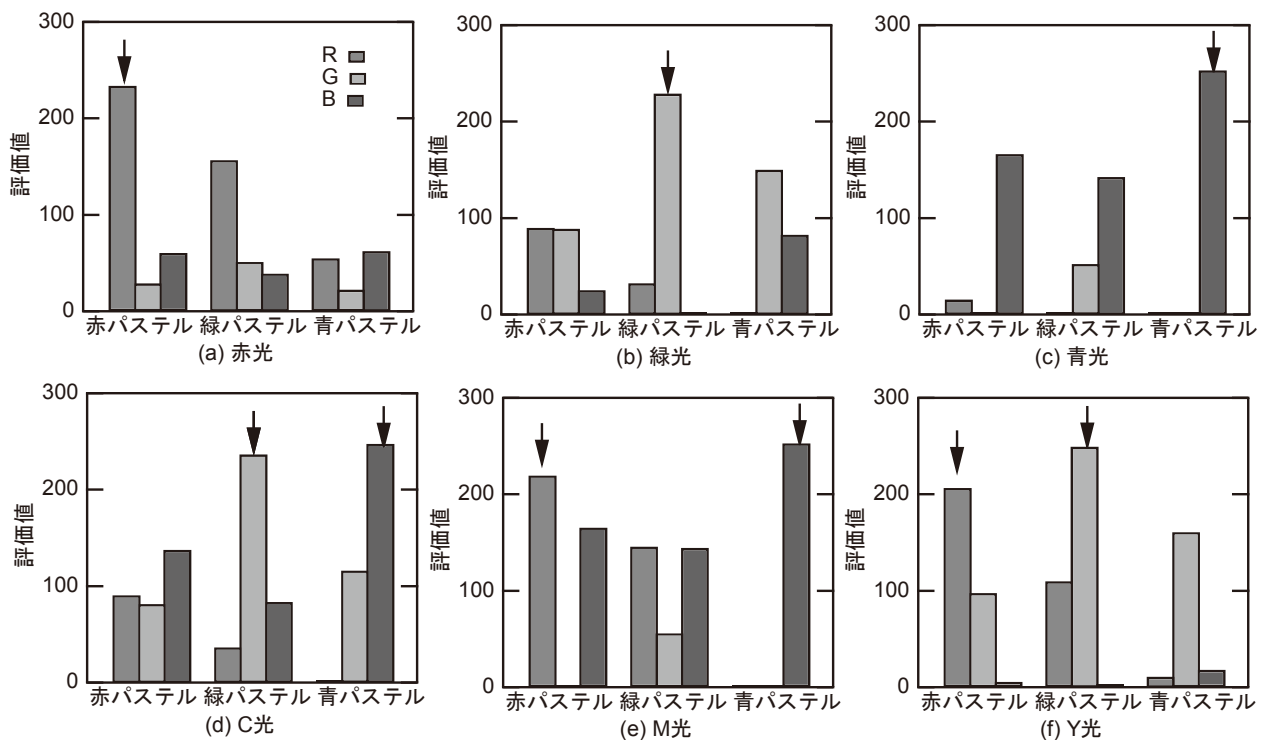


図6 パステルに各色の光を照射したときの色の評価値。(a) 赤光(255, 0, 0) (b) 緑光(0, 255, 0) (c) 青光(0, 0, 255) (d) C光(0, 255, 255) (e) M光(255, 0, 255) (f) Y光(255, 255, 0)を照射したときの各パステルのRGBの評価値を示す。本文中で着目する評価値に矢印をつけた。

6 まとめ

プロジェクターを用いた光の加法混色実験によって、鏡によって赤光、緑光、青光を合わせたときに白光となるようにRGBの値を調整すると、加法混色によってC（シアン）光、M（マゼンタ）光、Y（イエロー）光を作ることができた。この結果から、鏡とプロジェクターを用いて光の加法混色実験を行うことができるといえる。これによって、従来の加法混色実験^(3,4)を行う上で必要だったLED回路の自作や、ランプにゼラチンを張り付けるといった作業が不要になり、より手軽に加法混色実験を行うことができる。また、身近にあるプロジェクターやテレビ画面といったものに加法混色が応用されていることを、実験を通して生徒に伝えることができる。

減法混色による色の見え方を示す実験の結果より、赤光では赤パステルが、緑光では緑パステルが、青光では青パステルが最も明るく見えることを示すことができた。また、C光では緑、青パステルが、M光では赤、青パステルが、Y光では赤、緑パステルがそれぞれ明るく見えることを示すことができた。これらの結果から、物の色は光の吸収によって形成されていることを説明することができる。加えて、色料の三原色C、M、Yが光の三原色を吸収する色であると説明することができる。

本教材を用いる利点は以下の四点である。(1)中学校学習指導要領解説理科編に記載されている「白色光はプリズムによってさまざまな色の光に分かれることにも触れること」を、加法混色実験から示すことができる点。(2)色料の三原色は光の吸収によって形成されている色であり、C、M、Yは光の三原色をそれぞれ吸収する色の組み合わせであることを示すことができる点。(3)パソコンとプロジェクターがあれば手軽に実験できる点。(4)光の色の変更、調整が容易である点。(4)であげた利点は、本論文で紹介した演示実験のほかにも授業者の発想次第で多様な演示方法をとることができることを示している。実際に筆者の一人は、テレビ放送で用いられている方法のように画像や動画をRGBに分けておき鏡で集めてフルカラーにするといった演示や、光の形を変更し、ある部分は赤、ある部分はマゼンタに見えるようにするといった演示を授業で行っている。

本教材を用いた授業が行われることによって、生徒の物理に対する関心が高まること、生徒が光の三原色と色料の三原色が違うことを理解し、物の見え方について正しい認識を持つことを期待する。

引用及び参考文献

- (1) 文部科学省：「中学校学習指導要領解説理科編」（2019）30.
- (2) 例えば、霜田光一ほか：「新版 新しい科学1」東京書籍（2021）133.
- (3) 長谷川誠：「物理教育」55（2007）70-72.
- (4) 大坂厚志：「物理教育」44（1996）184-185.
- (5) 小野昌弘：「大阪市立科学館研究報告」26（2016）109-110.
- (6) 例えば、春日明夫ほか：「美術1 出会いと広がり」日本文教出版（2016）54-56.
- (7) Eugene Hecht：「ヘクト光学I」丸善出版
- (8) 文部科学省：「中学校学習指導要領解説理科編」（2019）33-34.

Additive and subtractive color mixing experiments using a projector

Yuto SHIBUYA* · Haruka OOKURA** · Yoshihiro OGAWA***

ABSTRACT

The three primary colors of light were output from a projector, and an additive color mixing experiment was conducted to show that the combination of the three primary colors results in white light. The additive color mixing experiment can be performed more easily by using this experimental method than the conventional method. We also conducted an experiment in which red, green, blue, cyan, magenta, and yellow light was output from a projector and irradiated on red, green, and blue pastels. We can explain subtractive color mixing from the combination of the color of the irradiated light and the pastel that appears brighter. That the three primary colors of light and colorants are different can be shown through these experiments.

* Joetsu University of Education (Master's Program) ** Joetsu University of Education (College of Education)

*** Natural and Living Science