

高等学校における加法混色・減法混色の授業開発 —「色あてクイズ」教材の活用—

南 宏人

千葉大学大学院教育学研究科修士課程

情報化が進む昨今において、視覚による情報取得の重要性は増している。その一方で、日本の初等・中等教育において人間の視覚、すなわち人間の眼が光や色をどのように認識しているかについて扱われる機会は少ない。そこで、人間の目がどのように光源色や物体色を認識し、視覚情報を得ているかを学ぶために、加法混色と減法混色に注目した授業を開発・実践した。授業開発は、授業の一般化の視点からプロジェクターによる光の照射を用いる渋谷ら(2022)の先行研究に基づいて行った。眼の構造が高等学校生物で扱われていることから関連をはかるため、高等学校で授業を実施し、事後アンケートから考察を行い授業プランの有効性と課題について検討した。

キーワード：加法混色、減法混色、高等学校理科、教科等横断、演示実験

1. 問題の所在

1.1. 色認識の科学的理解の必要性

人間の五感から得られる情報のうち、視覚情報の割合は大きい。特に情報化が進む昨今において、視覚情報の重要性は増している。例えば、インターネット上で行き交うテキスト・画像・映像・音声などの情報や、デジタル技術によりつくられるVR(仮想現実)やAR(拡張現実)は、スマートフォン・タブレット端末・VRゴーグル等の情報機器を通して得られる視覚情報として認識される。しかしながら、視覚情報の重要性が増す一方で、日本の初等・中等教育において人間の目が光や色をどのように認識しているかについて語られる機会は少ない。今井(2022)は、「日本の科学教育において、色についての系統的な学習をする機会は少ない」とし、その一方で、海外の複数の教科書において「電磁スペクトル、水素のスペクトルの内容がある」こと、「光と色に関するストーリーが15頁にわたって展開されている」ことを挙げている。その上で今井(2022)は、コンピテンシー(資質・能力)育成を基盤とした色に関する教科等横断的な視点に立った教育プログラムの開発は喫緊の課題であるとし、その第一段階として「光と色の科学」を挙げている¹⁾。日本の子どもたちにも、「見える」とは何か、人間の目が光や色をどのように認識しているのかということについての科学的理解を基盤とした授業開発は必要であると考えられる。

人間が光の色を認識するプロセスについて、大上・小栗(2017)は「人の目には、赤・緑・青の色を感じる錐体細胞がある。すなわち人の目は「発光体が出す光」や「物体の反射光・透過光」のうち可視光領域の長波長(赤系)、中波長(緑系)、短波長(青系)の成分を錐体細胞で感受し、その刺激が脳に伝達されることによって色を認識する」としている²⁾。これらの赤・緑・青の光はRGBや「光の三原色」としてまとめられる。これら3色の光をそれぞれ合わせると、赤と青はマゼンタ、青と緑はシアン、赤と緑はイエロー、赤・緑・青の全てを合わせると白色光となる。このように光の色をRGBの混色によって

説明するのが「加法混色」である。人間の目は加法混色によって光の色を認識しているといえる。

光の色の認識は加法混色により説明ができる一方で、物質の色の認識は加法混色とは異なる。物質の色の認識について今井(2022)は、「物質に白色光が当たると、表面で反射する光と透過する光に分かれる。このとき、白色光の一部の光が吸収されると、その補色が透過または反射される」としている³⁾。また今井(2022)は補色について、「混色すると白色光を生じる2色を互いに補色である」としている⁴⁾。すなわち、我々が物質の色を認識する際のプロセスは、白色光が物質に当たった際に吸収されずに反射または透過した光を目の錐体細胞で認識するというものであり、この時に認識される光は、白色光が当たった際に物質が吸収した光の色の補色である。このように、光源から出た光が物体に当たり、物体から反射または透過した光が人の目に入り、色知覚を生じたときの色を物体色という。これに対し、光源から出た光が直接人の目にはいり、色知覚が生じたときの色を光源色という⁵⁾。物体色は、CMYまたは「色の三原色」といわれるシアン・マゼンタ・イエローの三原色の混合比によってあらわすことができる。それぞれ、シアンとマゼンタは青、マゼンタとイエローは赤、イエローとシアンは緑、シアン・マゼンタ・イエローの全てを合わせると黒色となる。このような、インクや絵具等で用いられる物体色の混色を「減法混色」という⁶⁾。人間の目は減法混色によって物体色を認識していると理解されている。

加法混色と減法混色の知識を得ることで、人間の目がどのように光源色や物体色を認識し、視覚情報を得ているかを学ぶことが可能である。しかしながら、本節の冒頭で述べたとおり、日本の子どもたちは「見える」とは何か、すなわち人間の目が光や色をどのように認識しているかということについての科学的理解が十分とはいえない。これは初等・中等教育において加法混色や減法混色についてきちんと学ぶ機会に乏しいためであると考えられる。子どもたちは日ごろから物体の色を認識しているが、「見える」という現象を科学的知識に基づいて言語化することについてはまだまだ十分ではない。色の認識を科学的知識で再整理することには意義があり、子どもたちの色の認識が広がることで、一段と広い視野で情報認識ができるようになることが期待される。人の目が光や色をどのように認識するかということについて、目

Hiroto MINAMI : Development of Cross-curricular Lessons on Additive and Subtractive Color Mixing in Japanese High School Science : A Classroom Activity "Color Reasoning Quiz"
Graduate School of Education, Chiba University

の構造、光、色に関する知識を包括的に扱う授業の開発には、意義があるのではないだろうか。

1.2 先行研究の検討

加法混色と減法混色の教材化について、先行研究をもとに検討する。Google Scholar において「加法混色 減法混色 実験 教育」の 4 つのキーワードで先行研究をあたったところ、63 件が該当した。これらのうちから、初等・中等教育の授業を想定したものを除くと該当する先行研究は 7 件であった。また、内容読解から手法別に分類すると、ライトやプロジェクターにより実際に光を照射するもの、実験キットの使用や製作によるもの、コマを用いたものの 3 種類に大別することが可能であった。

まず、ライトやプロジェクターにより実際に光を照射する授業について見ていく。大藪ら(2017)では、金沢工業大学のオープンキャンパス内で実施される高校生を対象にした公開講座の中で、プリズムによる白色光の分解、RGB の 3 つの LED 光源を用いた加法混色の実験、光源色を踏まえ物体色について考える活動、色フィルターに 3 種の LED 光を照射する実験を実践している⁷。なお、LED 光源については科学教材として通信販売されているものを用いた⁸とあり、同様の実践をする際には実験機器の準備が必要である。これに対し、渋谷ら(2022)は、プロジェクターから赤、青、緑の 3 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ている⁹。この方法では単色の LED ライトではなくプロジェクターを用いることで、従来の方法よりも簡易的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により、減法混色による色の見え方についても説明している¹⁰。プロジェクターは文部科学省の GIGA スクール構想によって端末やネットワーク環境とともに整備されたため、大藪ら(2017)の頃と比べ、実験機器を揃えられる環境は整っている。

次に、実験キットの使用や製作による授業を取り上げる。松村(2012)では、小・中学生に対して、加法混色と減法混色を学ぶ授業を実践している。具体的には、プリズムによる白色光の分解の実験、中村理工工業株式会社(現ナリカ)製の「光の三原色観察器」を用いた加法混色の実験、ルーペを用いた液晶の観察実験、眼の構造についてのスライドによる解説、色つきセロファンを用いた光の吸収についてのスライドによる解説、減法混色についてのスライドによる解説を授業内で実践している¹¹。加法混色の実験に市販の実験キットを用いるため、先ほどの大藪ら(2017)と同様に実験機器の購入の必要がある。また、減法混色についてはスライドを用いた説明にとどまっており、渋谷ら(2022)のように視覚的アプローチにより減法混色を学ぶ活動はなされていない¹²。また、長谷川(2007)は「赤、緑、青の各 LED 発光回路を利用した光の三原色実験セットを製作」している¹³。この実験セットを用いて高校生を対象にした実験授業をしているものの、論文では主に教材の製作について述べられており、具体的な授業実践については言及がない。また、長谷川(2007)は「簡単な回路構成で製作できる」¹⁴としているが、材料の準備や実験装置の組み立ての手間が生じることは避けられない。さらに、長谷川(2007)では、減法混色についての実験がなされていないため、授業で用いる際には減法混色について追加の解説が必要である。また、

中橋ら(2017)では、長谷川(2007)の実験装置と同様に RGB の 3 個の LED を用いたカラーミキサという工作キットを作成する授業を提案している。中橋ら(2017)では、「工作を楽しみながら、色の仕組みを学ぶのが目的」¹⁵としているが、主にキットの構成に関する内容について述べられており、長谷川(2007)と同様、具体的な授業実践には言及がなされていない。また、中橋ら(2017)でも減法混色については疑似的な実験に留まっているため、長谷川(2007)と同様、授業で用いる際には減法混色について追加の解説が必要である。

最後に、コマを用いた授業について取り上げる。大上・小栗(2017)は、赤・緑・青の 3 色の LED の光を光ファイバーで取り出し、混色してできたシアン・マゼンタ・イエローの光をインスタントフィルムに露光させる教材を作成した。フィルムには光を遮るマスクがあり、マスク位置を変えながら露光させることで、シアン・マゼンタ・イエローをエリアごとに分けてフィルムに映すことができる。これによって、光源色を用いた加法混色を学ぶことができる上に、フィルムで撮影することで物体色に変換することが可能である。さらに、大上・小栗(2017)は、シアン・マゼンタ・イエローの 3 色を撮影したフィルムの中心を軸にし、コマのように回転させることで色づいた部分が黒くなることから減法混色を確認できるとした。また、同様の実験をシアンとイエローの 2 色で行ったところ、緑色となることで減法混色を確認したとし、光の三原色と色の三原色の関連をはかりながら同時に学習できる教材の可能性を述べている¹⁶。一方で、渋谷(2022)以外の先行研究でも述べられた、実験装置の製作や材料調達の手間の問題がある。また、室谷(2019)は、「外側から RGB、CMY、RGB の 3 色で塗り分け」たコマを回転させることで「RGB に塗り分けたベルトの方が濃いグレーに、CMY に塗り分けたベルトの方が薄いグレーに」なる実験を行っている¹⁷。しかしながら、室谷(2019)の実験はコマを回転させたときの光の反射を観察することから、これまでに述べてきた加法混色や減法混色とは異なる、「面積当たりの平均や時間平均を取る混色」¹⁸すなわち「中間混色」に注目しているため、加法混色と減法混色を学ぶ教材というよりは、加法混色と減法混色を学んだ後の応用的な教材という位置づけと考えてよいだろう。

先行研究の検討から、加法混色と減法混色を学ぶ授業としては、ライトやプロジェクターにより実際に光を照射するもの、実験キットの使用や製作によるもの、コマを用いたものの 3 種類があることがわかった。このうち、実験キットの使用や製作による実験については、材料調達や製作に対する手間や時間がかかることや、減法混色についての実験ができないことなどの短所が挙げられる。コマを用いた実験でも、実験装置の材料調達や製作に対する手間や時間がかかることや、中間混色の影響を受けやすいことなどの短所が考えられる。これに対しライトやプロジェクターにより実際に光を照射する実験は、他の 2 種類の実験において述べたような短所がない。なおかつ、プロジェクターは文部科学省の GIGA スクール構想によって端末やネットワーク環境とともに整備されたため、渋谷ら(2022)の実験機器については多くの学校で揃えられる環境が整っていると考えられる。また、具体的な授業プランについては、実際に小・中学生に対してプリズムによる分光、加法混色、減法混色と順を追って授業実践を行っている松村(2012)が参考になると考えら

れる。よって、初等・中等教育において加法混色と減法混色を教材化するにあたり、本研究ではプロジェクターによる光の照射を用いることで加法混色と減法混色を同時に扱うことが可能な渋谷ら(2022)の先行研究に基づき授業プランを作成する。また、渋谷ら(2022)の実験の前段階として、学習者は白色光が光の三原色の混色であるということについて予備知識を持っておく必要がある。そのため、松村(2012)の先行研究で用いられたプリズムによる白色光の分解を導入として行い、渋谷ら(2022)の実験へと進むことで、段階的な学習が可能になることが期待される。

1.3 初等・中等教育における加法混色と減法混色

本研究では、初等・中等教育における理科やその他の教科・科目の授業において、加法混色と減法混色に関する内容が深く扱われていないという想定のもと、眼の構造や可視光線の知識と関連付けて学ぶことが可能な高等学校の理科、または美術の色彩学習や情報におけるモニターやプリンターインクの混色とも関連付けた教科横断的な学びとしての授業実践を構想している。ここからは、加法混色と減法混色が現行の学習指導要領と教科書において、どの学校種の、どの教科・科目で扱われているかを確認し、高等学校での実践が妥当であるかについて検討を行う。まず、学習指導要領において「混色」という言葉が見当たらないことから、学習指導要領上は「混色」が単元として直接的に取り上げられていないことが考えられる。次に、加法混色と減法混色の学習が含まれる可能性のある単元を調べるために、「眼」と「光」の 2 つの語について学習指導要領を確認した。なお、「目」ではなく「眼」とした理由について、まぶたや目頭など部分を除いた光を感知する「眼球」のみに限定する意図がある。なお、今後は論文内において「目」と「眼」はどちらも「眼球」を表す言葉として区別なく用いることとする。確認の結果、学習指導要領において、これらの内容に該当する単元を含む教科・科目は、理科と美術であった。ここからはそれぞれの教科において、先ほど挙げた 2 つの内容が単元の中でどのように扱われているかを見ていく。

ここからは理科における「眼」、「光」の扱いについて見ていく。まず「眼」については、高等学校理科の生物における「刺激の受容と反応」の単元で「受容器として眼を、効果器として筋肉を扱うこと」とある¹⁹。また、「眼」という語は含まれていないものの、高等学校理科の科学と人間生活の中には「生命の科学」という単元が存在し、内容の取り扱いには「視覚」についての基本的な仕組みを扱うこととある²⁰。これは、目の構造や混色・色認識に関連する内容だと考えられるが、文部科学省(2018)の記述だけでは具体的な内容は判断できないため、教科書の読み取りを行う必要がある。なお、高等学校段階で「眼」が登場する理由として、高等学校生物での記述にある「受容器」という言葉から、受容器である眼の学習の前に、神経系の基礎的内容を踏まえる必要があるためであることが読み取れる。加法混色と減法混色の授業について、眼の構造に関する知識を関連づけるのであれば、高等学校の理科に位置付けられる可能性があるだろう。次に、「光」に関する学習については、小学校理科、中学校理科、高等学校理科の科学と人間生活および物理で見られる。小学校理科では、第 3 学年の「物質・エネルギー」の中で「光や音の性質」という単元が

存在する²¹。しかし、この単元では、光が直進すること、集めたり反射させたりできることや、当たった際の明るさや暖かさという視点で学習が構成されており、色や見え方に関する内容は見られない²²。中学校理科では第一分野で「光と音」という単元が存在する²³。しかし、この単元では光の反射と屈折という視点で学習が構成されており²⁴、「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」²⁵という文言はあるものの、単色光を重ねることで白色光になるという加法混色や、物体色に注目した減法混色の学習までは至らない可能性がある。高等学校理科の科学と人間生活では「人間生活の中の科学」の単元において、「光の性質とその利用」についての学習が存在する²⁶。一方で、内容の取り扱いには「光の波としての分類や性質を扱うこと」²⁷とあり、光の色ではなく波としての性質に注目していると考えられる。物理では「波」の単元において「光」としての学習が存在する²⁸。さらに確認したところ、「光の伝わり方」と「光の回折と干渉」が主な内容となっている²⁹ことがわかった。加法混色・減法混色を扱う授業を小学校理科、中学校理科、および高等学校理科の物理に位置付ける場合、眼の構造に関する内容は紹介程度にとどめる必要があると考えられる。

ここからは美術について見ていく。美術では「眼」について扱う単元はなく、「光」に関する内容のみであった。中学校では、「光」について単元として扱ってはいないものの、〔第 1 学年〕2 内容の〔共通事項〕として、「形や色彩、材料、光などの性質や、それらが感情にもたらす影響を理解すること」とある³⁰。高等学校では、美術 I 「表現」の中の「映像メディア表現」の単元において「色光や視点、動きなどの映像表現の視覚的な要素の働きについて考え、創造的な表現の構想を練ること」とある³¹。

また、学習指導要領の美術に関する記述において「色彩」という言葉が用いられていたことから、小学校・中学校・高等学校のそれぞれの学習指導要領において「色彩」についても確認した。その結果「色彩」は、中学校学習指導要領の美術、高等学校学習指導要領の芸術における美術 I、工業、家庭、情報、美術で扱われていることがわかった。このうち、工業、家庭、情報、美術は、主として専門学科において開設される教科であり、本研究では普通教育について主に検討することから、専門教育については対象としないこととした。なお、このうち家庭と情報に関しては、普通教科と専門教科の両方があるが、主として専門学科において開設される教科の家庭では色彩は服飾に関する科目や単元で多くみられ、各学科に共通する教科の家庭では服飾で色彩を扱うまでには至らないことが文部科学省(2018)から読み取れた。一方で、各学科に共通する教科の情報においては、文部科学省(2018)から「色彩」に関する内容が存在するか否かが読み取れなかったため、教科書についても読み取りをする必要があると考えられる。

ここまで、学習指導要領を確認して得られたことをまとめる。加法混色・減法混色を扱う授業は、目の構造を関連させることを考慮すれば、学校種としては高等学校での実践が望ましいと考えられる。一方で、目の構造に関する内容を大きく取り上げないのであれば、小学校や中学校での実践も可能であるとも考えられるが、色彩に関する内容が高等学校の芸術や情報にあることも考えると、本研究では対象を高等学校として授業プランを検討

したい。また、高等学校での実践を想定すると、教科の位置付けに関しては各学科に共通する教科のうち、理科の科学と人間生活、物理、生物、芸術の美術 I、情報の情報 I が考えられる。一方で、複数の教科において異なる文脈で登場することから、特定の教科や科目に位置付けず、教科横断的な授業として授業プランを構築することも考えられる。

次に、先ほど挙げた高等学校の教科・科目に関して、教科書の記載内容を確認する。まず、高等学校の生物については、眼に関する単元の中で錐体などの視細胞についての記述は見られるものの、加法混色や減法混色に該当する記述は見られない³²。次に、高等学校の物理については、光に関する単元の中で光の分散やスペクトル、可視光線の波長と色の関係についての記述はあるものの、波としての性質が主に語られており、混色に関する記述は本文中には見られず、教科書によっては本文外の付録に掲載されている³³程度であった。高等学校理科の科学と人間生活の眼に関する単元では教科書にも生物と同様に錐体などの視細胞についての記述は見られるものの、混色に関する記述は見られない³⁴。一方で、光に関する単元においては出版社ごとに差異が見られる。本文中で光の三原色に触れ、付録で物体色に触れているもの³⁵、本文外の付録に光の三原色に関する錐体や加法混色等にも言及した記述が見られるもの³⁶、教科書内で光の三原色を単元として設定し加法混色や物体色の見え方まで言及しているもの³⁷など、さまざまである。総じて加法混色や減法混色についての学習は存在するものの、教科書によって学習の深度に差異があるといえる。高等学校美術 I の教科書を参照したところ、巻末資料「色彩」の中で、加法混色と減法混色に触れているものの、眼の構造と関連させる内容は見られなかった³⁸。また、情報 I の教科書においては、本文中で光の三原色と色の三原色を取り上げ加法混色や減法混色にも触れているもの³⁹と、本文外の付録で取り上げているもの⁴⁰が見られた。教科書によっては RGB のセロハンをそれぞれライトに被せて照射する実験のページもあり⁴¹、混色について詳しい内容を扱う学習があるといえる。一方で、それらの混色に関する学習は目の構造とは関連づけられておらず、ディスプレイやインクの混色を説明するに留まっている。

教科書の読み取りから、加法混色と減法混色は、高等学校での教科・科目のうち、理科における科学と人間生活、物理、生物、芸術における美術 I、情報における情報 I のいずれかに位置付けられると考えられる。一方で、生物では混色に関する記述が少なく、それ以外の教科・科目では目の構造と関連づけられていない。科学と人間生活には、両方についての記述があるものの、全日制の公立高等学校における科学と人間生活の履修率は高等学校全体で 33.1%と低く、かつ多くの履修者は職業教育を主とする専門学科と総合学科に集中しており、普通科での履修率に至っては 11.5%である⁴²。よって、教科・科目への位置付けとしては科学と人間生活が適当であると考えられるものの、科学と人間生活が開講・履修されていない学校が多く、理科の授業として各学校で広く実践することは難しいと考えられる。

加法混色や減法混色を学ぶことは「眼」、「光」、「色彩」を統合的に扱いながらヒトの眼が色を認識する「視覚」とは何かを知るための学習である。初等・中等教育において、これらは理科、美術、情報をはじめとする複数の教科・科目のそれぞれで異なる文脈で登場する。

そのため、加法混色と減法混色から「視覚」について学ぶ授業は、眼の構造と関連付けるのであれば高等学校での実践が適当であり、教科・科目の位置づけに関しては単一の教科・科目ではなく複数の教科・科目の内容を架橋する教科横断的な学びとしての実践が適当であることが示唆される。

2. 研究の目的

2.1. 研究の目的

本研究では、高等学校において加法混色と減法混色に着目することで、人間の眼の構造、光と色彩の感知といった「視覚」という理科、美術、情報といった教科を横断する内容について統合的に学ぶ授業の開発を行う。先行研究である松村(2012)と渋谷ら(2022)をもとに授業プランを開発して実践する。その結果を分析し、色認識に関して実験を通して学ぶ授業プランを示す。

2.2 研究の方法

渋谷(2022)をはじめとする先行研究に基づいて 1 単位の授業を開発する。これまでの検討から、「光」、「色彩」、「眼の構造」について扱うため、特定の教科に位置付ける場合は高等学校理科の科学と人間生活が内容的には近いものの、この段階では特定の教科には位置付けず、教科横断的な学びとして授業を実施する。授業については事後アンケートを用いて収集した情報から考察を行い授業プランの有効性と課題について検討する。

3. 授業の開発

3.1. 授業実践校

千葉県内の公立高等学校全日制普通科 1 年次を対象に授業を行った。実践時期は冬季休業直前の 12 月中旬である。なお、実践校では、科学と人間生活が開講されていないため、理科を中心とする教科横断的な授業として実施した。時間割上では化学基礎の時間に行ったが、生徒には事前に教科横断的な授業であることを伝えている。授業実践は別々のクラスで 2 回行った。先に授業実践を行ったクラスを A 組、後に授業実践を行ったクラスを B 組とする。

3.2 教材の開発

授業実践にて用いる実験教材を以下の表 1 に示す。実験は 4 種類である。実験①～④についてそれぞれ述べる。

表 1：実践に用いる実験教材

実験	参考にした先行研究
実験①CD で虹を作る	松村(2012)
実験②CD の回折格子で光を分解する	松村(2012)
実験③ プロジェクターと鏡を使った加法混色	渋谷ら(2022)
実験④色当てクイズ	渋谷ら(2022)

①CD で虹を作る

松村(2012)をはじめとする加法混色の実験では、まずプリズムによる白色光の分解の実験を行っている。これは、白色光が RGB の 3 色の光源色の混色であることを示

すために、白色光を分解し RGB を取り出す実験が必要であり、かつ容易に実験が可能であるためと考えられる。

本実験では、生徒の興味と関心を高めるためにガラスプリズムではなく、CD や DVD に用いられている回折格子による実験を行う。回折格子とは、透明なガラスやプラスチック板の一部分に一定間隔で溝を掘ったもので、光の回折や干渉を利用して白色光を色ごとに分けるものである。CD や DVD の記録層の上にはポリカーボネートの層があり、この部分が回折格子となっている。屈折を使うプリズムとは原理が少し異なるものの、回折格子も白色光の分解が可能であり、プリズムの代用が可能かつ生徒にとっても身近であると感じたため回折格子を使用した。CD や DVD の磁気ディスクに白色光(実験では晴天時は太陽光、曇天時はプロジェクターから照射した白色光)を反射させることで、回折格子による白色光の分解により、太陽スペクトル(虹)の観察が可能となる。

②CD の回折格子で光を分解する

上記①でも述べたとおり、松村(2012)をはじめとする加法混色の実験では、まずプリズムによる白色光の分解の実験を行っている。①では白色光を反射させたが、②では CD や DVD から取り外した回折格子に白色光を透過させて分光の観察実験を行う。なお、実験では CD と比べてポリカーボネート層が厚く、回折格子の取り外しがしやすい DVD を用いる。生徒には正しくは回折格子ということは説明したうえでプリズムと同じように白色光を色ごとに分解する装置であることから便宜上「CD プリズム」として紹介した。よって、以下 CD プリズムと表記する。

生徒はスマートフォンの LED ライトを点灯させ、CD プリズムを通してその光を観察する。LED ライトと CD プリズムの距離や角度を調節することで CD プリズムにより白色光が分解され、中心から外側に向けて順に青、緑、赤の光の円が観察できる。なお、生徒には事前に個人持ちのスマートフォンを授業に持参するように指示をしておき、スマートフォンのない生徒には白色 LED ライトを貸し出している。

CD プリズムの分離は、カッターナイフを使用するため、安全管理の観点から教員がすべて行った。手順としては、カッターナイフの刃をポリカーボネート層と記録層の間に差し込み、DVD を回転させながら回折格子を取り出した。なお、ポリカーボネート層と記録層は癒着が強く、回折格子だけを取り出すことは難しい。回折格子の面積に対し、記録層が付着していない透明部分が 6 割程度あれば実験は可能と判断し、使用した。

③プロジェクターと鏡を使った加法混色

渋谷ら(2022)で実践された、プロジェクターと鏡による加法混色の演示実験である。今回は、実践校の備品である EPSON の短焦点プロジェクターを用い、鏡で反射させた光は黒板に照射した。プロジェクターから照射した画像を図 1 に、実験装置の写真を図 2 に示す。

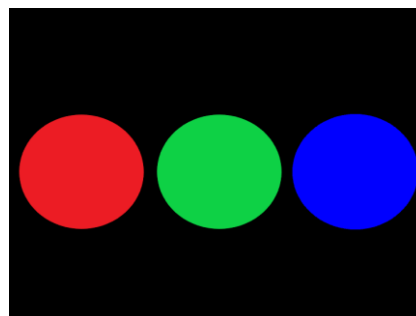


図 1：照射した RGB 画像



図 2：実験装置の写真

授業前の予備実験で鏡の距離と角度を調節し、照射直後は RGB の光がそれぞれ重ならないようにセットしておく。その後、G 光を反射する鏡は固定したまま、R 光と B 光を反射する鏡の角度を調節する。先に R 光を反射する鏡を動かすと、G 光と R 光の重なった部分では、加法混色により Y 光が観察できる。その後、B 光を動かすと G 光と B 光が重なった部分で C 光、R 光と B 光が重なった部分で M 光、RGB の 3 色が重なった部分で白色光がそれぞれ観察でき、光源色の加法混色が確認できる。

④色あてクイズ

渋谷ら(2022)で減法混色の確認で用いられた実験をもとに自作した教材である。渋谷ら(2022)の実験は「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」ものであった⁴³。また渋谷ら(2022)は、「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」できるとしている⁴⁴。

授業実践にあたり、本研究では渋谷ら(2022)のパステルを用いた減法混色の実験をクイズ形式にする教材を考案した。具体的には、R 光、G 光、B 光、C 光、M 光、Y 光に加えて白色光を入れた合計 7 色の光を渋谷ら(2022)の実験と同様に一色ずつプロジェクターによって照射し、それらの光の中で授業者が手に持って提示している R、G、B、C、M、Y、K のサインペンの色を学習者が当てるといものである。実験器具として、サインペンを用いた理由は、カラーバリエーションが豊富であり、必要な色を簡単に入手することができるためである。手順としては、まず R 光の中でサインペンを提示し、スライドショーで光を G 光、B 光、C 光、M 光、Y 光と切り替えていく。生徒は各色の光の下で見たサインペンの色から白色光下でのサインペンの色を推理する。例えば、R 光下で黒く見えるサインペンは、R 光を反射しない色で

あると考えられるため、 $G \cdot B \cdot C$ のどれかである。次に G 光下でサインペンが緑色に見えた場合、緑を反射する色であるため $G \cdot C$ のどちらかである。このように、単色光下での物体色から白色光下での物体色を導くためには、反射する光の組み合わせから思考・判断をする必要がある。生徒は、 R 光、 G 光、 B 光、 C 光、 M 光、 Y 光下で観察したサインペンの物体色の見え方から、白色光下での物体色を予測して回答し、最後に白色光下で答え合わせをする活動が可能になる。これにより、渋谷ら(2022)が示した減法混色の実験に、生徒が思考と表現をする活動を取り入れることで、生徒の興味・関心をさらに高めることが可能であると考えられる。

3.3 授業プランの概要

3.2で開発した教材をもとに、授業プランを作成した。

表 2：開発した授業プラン

段階	活動
導入	<p>授業者の自己紹介とスライドの文字が見えるか(フォントサイズ)の確認</p> <p>導入発問：「見える」とは何か？ ・近くの席の生徒どうしでの協働的な学びにより授業を受ける前の段階での知識の確認と共有。 ・生徒どうしの発話から聞こえる「光」などのキーワードを取り上げる。</p> <p>目標と流れの確認 授業目標：「見える」とは何かを理解できる 流れ：視覚についての4つの演示実験を行う</p>
実験 1	<p>発問：「光(白色光を指す)は、さまざまな色の光に分解できる」ということを知っているか？ ・近くの席の生徒どうしで相談し事前知識の確認。 ・生徒どうしの発話から聞こえる「虹」や「プリズム」などのキーワードを取り上げる。</p> <p>実験①「CDで虹を作る」を実施 ・プリズムや水滴によって白色光が屈折することで白色光を波長ごとに異なる色の光に分解が可能であることを示す。</p> <p>実験②「CDプリズムで光を分ける」を実施 ・CDプリズムを通して白色光を分解すると中心から外側に向けて順に青、緑、赤の光の円が観察できることから光の三原色がRGBであることを確認する。</p>
解説 1	<p>以下の内容についてスライドを用いて解説 ・光の三原色とは白色光を分解したときに得られる赤、緑、青の三色である。 ・人間の眼にはRGBの光をそれぞれ感知する錐体細胞と呼ばれる細胞がある。よって、眼とは光の三原色を感知するセンサーの役割を有する器官であるといえる。</p>

	<p>・RGBの光の混合割合による混色を加法混色といい、人間の眼は加法混色によって光の色を認識していると理解されている。</p>
実験 2	<p>解説 1 で示した加法混色の図を提示 本当に光の三原色の混色によって白色光が得られるのだろうか？ ・近くの席の生徒どうしで相談し、思考。</p> <p>ヒント ・赤と青と緑の絵の具を混ぜたら黒っぽい色になるという物体色のイメージとのギャップ ・分解ができて混色ができるとは限らないことを補足する。</p> <p>実験③「プロジェクターと鏡を使った加法混色」を実施 ・加法混色を理解する。 ・物体色への導入とする。</p>
解説 2	<p>発問：混ぜると白くなる光の色と、混ぜたら黒っぽくなる絵の具の色、この違いはなんだろうと思う？ ・近くの席の生徒どうしで相談し、思考。</p> <p>以下の内容についてスライドを用いて解説 ・光の三原色とは別に色の三原色 CMY というものがある。 ・人間の眼は光を感知するが光を発していない物体もあること示す。(リンゴは暗闇で光らない等。) ・物体色は白色光が当たった場合に、光の三原色 RGB それぞれの光の反射と吸収の割合によって決まることを示す。 ・絵の具とは、自身の色のみを反射し、それ以外の光を吸収する物体である。絵の具を混合することで反射できる色が減ってしまい、減法混色が起こることを示す。</p>
実験 3	<p>実験④「色当てクイズ」を実施 ・減法混色について体験的に学習する。 ・解説等は行わず生徒は減法混色の知識を用いて思考する。</p>
解説 3	<p>視覚情報の曖昧さと思考の重要性についてスライドを用いて生徒にメッセージを送る ・視覚情報はただの光であり、光を操作することで改変が可能。 ・視覚情報を鵜呑みにしてに惑わされず、視覚情報をもとに「見えない部分」まで科学的に思考することが重要である。 ・このような理科の見方・考え方を理科の各科目や美術や情報などの他教科、普段の生活でも意識してほしい。</p>
まとめ	<p>授業アンケートの提出(Microsoft Forms を使用)</p>

3.4 事後アンケート

授業実践後に行うアンケート項目について以下に述べる。アンケート項目は本研究について、(1)高等学校での実践以前に「視覚」についての予備知識や学習の経験があるか、(2)どのような資質・能力の涵養に寄与するものであるか、(3)渋谷(2022)の減法混色の実験をクイズ形式にすることで興味・関心を高められたか、以上の 3 点を選択式により問うものとした。以下、各項目の意図について具体的に述べる。

(1)については、人間の眼の構造、光、色彩の感知といった「視覚」についての学びを、これまでに経験したか、またどの程度の知識を有しているかを確認する質問を設定する必要がある。本研究における授業内容である加法混色と減法混色が、これまでの学習であつかわれたかを問う「この授業は、今まで知らなかった新しいことを学ぶことができる授業でしたか」という質問を設けた。四件法での「そう思う」、「どちらかといえばそう思う」の割合が高ければ、小学校及び中学校の授業や学校外での学習を含め、加法混色や減法混色についての知識に触れる機会が少なく、高等学校での実践が妥当である可能性が示唆される。

(2)については、本研究の授業実践がどのような資質・能力の育成に寄与するかを検討するために設定した。そこで文部科学省の掲げる資質・能力である「知識及び技能が習得されるようにすること」、「思考力、判断力、表現力等を育成すること」、「学びに向かう力、人間性等を涵養すること」という文言⁴⁵から、授業内での生徒の活動に基づいて抽出を行い、「光の見え方についての知識・理解」、「思考力・判断力」、「学びに向かう力」の三項目を設定した。また、文部科学省は OECD が実施する PISA 調査における「科学的リテラシー」について、「自然界及び人間の活動によって起こる自然界の変化について理解し、意思決定するために、科学的知識を使用し、課題を明確にし、証拠に基づく結論を導き出す能力」⁴⁶としている。本授業実践での活動、特に色当てクイズは、この「科学的リテラシー」の涵養に寄与する可能性に鑑み、「科学的知識を用いて結論を導く力」という項目を加えた合計四項目でアンケートを実施した。

(3)については、教材の開発で述べた「渋谷ら(2022)が示した減法混色の実験をクイズ形式にアレンジし、生徒の興味・関心を高めることが可能である」ことの検討を行う必要がある。全ての実験のうち、どの実験が最も印象に残ったかを問うことで、クイズ形式にしたことにより、生徒の興味・関心を高められたかを検討する。

最後に、本授業実践が加法混色と減法混色を学ぶことができる構造になっていたかを自由記述により判定する。質問項目としては学習者が色当てクイズの際に加法混色と減法混色の知識を用いた色の推理が達成できていれば、十分であると考えられる。そこで、質問項目は色当てクイズの実験で、サインペンの色を当てるために、あなたはどのような推理をしましたか」とし、生徒は自由記述によって回答するものとした。

以上、四つの質問項目により収集した情報から考察を行い授業の有効性と課題について検討する。なお、回答にバイアスがかからないように、アンケート項目についての詳細な説明はしないこととした。

4. 結果と考察

事後アンケートの結果を以下に示す。

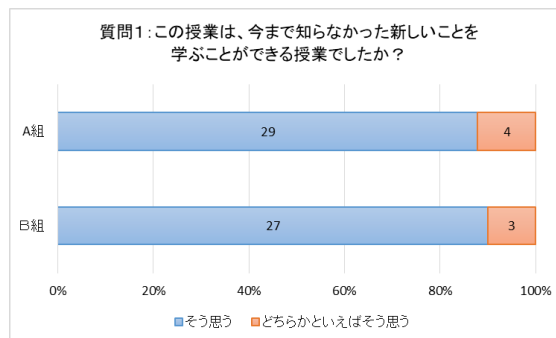


図 3：質問 1 への回答

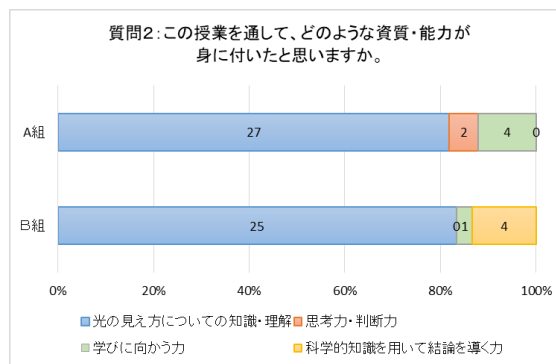


図 4：質問 2 への回答

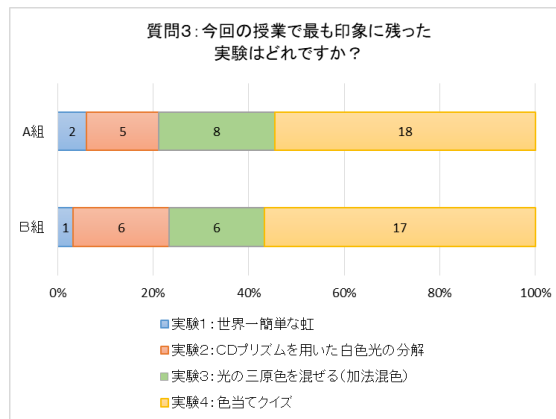


図 5：質問 3 への回答

質問 1 と質問 2 への回答から、実践校の生徒たちは高校 1 年生の 12 月までに加法混色と減法混色について深く学ぶ機会がなかったことが示唆される。勤務校では 1 年次に情報 I を全員が履修する。授業を参観した情報 I の授業担当教員に授業で加法混色と減法混色について扱ったかを確認したところ、「内容については軽く触れる程度、時間としては数分程度だった」と述べた。また、授業を参観した美術の授業担当教員に混色についての学習

があったかを確認したところ、美術は選択科目であり、1年次の3分の1しか履修をしていないとした上で、加法混色と減法混色については巻末資料を示し、軽く触れる程度だったと述べている。このことから、加法混色と減法混色については初めて扱う学習内容ではないということが伺える。それにもかかわらず、授業を受けた生徒の100%が「いままで知らなかった新しいことを知ることができた」と回答したことについて少しふれる。このことについて、情報や美術などの過去の加法混色と減法混色についての学習では、眼の構造と関連づける学習がなく、色彩・光・眼という3つの知識につながりをもたせたことで、生徒は「新たな知識を得た」と感じていることが考えられる。眼の構造という理科の専門知識を関連させることで、色彩の学びが深められたことが考えられることから、理科の授業で加法混色と減法混色を扱う意義が示唆される。

また、質問3への回答から、最も学習者に印象を残したものは実験④の「色当てクイズ」であることがわかる。このことから、3.2で渋谷ら(2022)の先行実践に加えた、生徒が思考と表現をする活動を取り入れ、生徒の興味・関心を高めるための工夫が学習者の興味・関心を高めるために有効であった可能性が示唆される。加法混色と減法混色の実験は、観察がメインになるため、プロジェクターによる投影を用いることもあり、どうしても演示実験の形になってしまう。クイズ形式にすることで、一方向的な演示実験の形にせず、学習者が参加できる双方向的な構造にすることが可能である。一方で、授業を参観した教員からは、演示実験の印象に対して、「そもそも実験③の演示におけるRGBの加法混色で生じる白色光が、美術や情報の教科書にあるような、きれいな白色光にならなかったため生徒の印象に残らなかったのではないか」という指摘があった。実際に、A組の生徒からは実験③で加法混色をした際に「白い」、「きれい」等の感想の声があがった。一方で、B組の生徒からは「あれ?」、「黄色っぽい?」、「まっ白か?」等の疑問の感想の声があがった。この原因としては渋谷ら(2022)ではスクリーンに光を照射していたのに対し、本研究では黒板に直接照射したため黒板の緑色が入ってしまったこと、プロジェクターの光は長波長の赤色が強く短波長の青色が弱くなる性質があるためなど複数考えられる。加えて、色覚多様性に代表される眼の錐体のはたらきの個人差等に鑑みると、生徒全員が「きれいな白色」を見ることは難しい。実験③において「白に見えた」という反応をしたA組と、「白に見えなかった」という反応をしたB組とで、質問3の回答を比較しても実験③と答えた人数と実験④と答えた人数に大きな差は見られないことから、実験③で「きれいな白色光」が観察できた場合にも、実験④のほうが生徒の印象に残ったと考えられることから、クイズ形式にしたことが興味・関心を高めるために有効であった可能性が示唆される。

最後に、質問4「色当てクイズの実験で、サインペンの色を当てるために、あなたはどのような推理をしましたか」に対する自由記述の内容のうち、加法混色と減法混色の知識に基づいて色当てクイズの構造を理解していると見受けられる回答、反射と吸収の關係に言及できず単なる減法混色によって考えていると見受けられる回答、内容理解に至っていないと見受けられる回答の3つについて、代表的なものを抜粋し、考察を行う。

A組

- (1) 反射してる色が黒っぽい→その色を含んでいない色
反射してる色が黒ではない→その色を含んでいる色と考えた。
- (2) サインペンの色が反射するかしないかで推理した 黒の場合は全てを反射しないので見分けるのが簡単だった
- (3) 最初は自分の思った色をバンバン言っていたけど後から背景によってペンの色が反射するかしないかを見分けました。
- (4) この色に当たってこの色に見えるということは何色と何色が混ざっているのかなーと考えた。でも難しかった。
- (5) 直感!

A組の回答には(1)や(2)のように「反射」や「吸収」という用語を用いて、目に見えている色そのまま答えるのではなく、それらの見え方から思考・判断をして白色光下での物体色を導くという「色当てクイズ」の構造を理解していると見受けられる回答が33件中21件見られた。その中には(3)のような、生徒の思考の変容が見られるような感想も見られた。また、(5)のように、内容理解に至っていないと見受けられる回答が5件見られた。また、(4)のように反射と吸収の關係に言及できず、単なる減法混色として考えているような回答も7件見られた。このことから、加法混色と減法混色を扱う授業の最後に実践した「色当てクイズ」により、6割程度の生徒に対し、光源色と物体色は異なり、物体色とは反射光の色であるという理解が得られたと見受けられる。

B組

- (1) 赤に当てたら黒だったから補色だから緑!ってわかった
- (2) 赤で黒く見えたら、赤色を反射しない、黄色で黒く見えたら黄色を反射しないなど、黒く見えるものを含む色を選択肢から除外した。
- (3) 色を判断するより黒をしっかりと判断することが大切なのかなと思いました。
- (4) 背景の色の違いで見える色が変わるのでその変化の違い
- (5) 三原色と照らし合わせた

B組の回答にも、(1)や(2)のように、「補色」や「反射」といった用語を用いて、目に見えている色そのまま答えずに、それらの見え方から思考・判断をして白色光下での物体色を導くという「色当てクイズ」の構造を理解していると見受けられる回答が30件中25件見られた。B組では「吸収」を「黒」と表現する生徒が多く、(3)のように「照射した光の色に対し物体が黒く見える」ことに注目する回答が多く見られた。また、(4)のように、反射と吸収の關係に言及できず、単なる減法混色として考えているような回答が4件、(5)のような内容理解に至っていないと見受けられる回答が1件見られた。このことから、加法混色と減法混色を扱う授業の最後に実践した「色当てクイズ」により、8割程度の生徒に対し、光源色と物体色は異なり、物体色とは反射光の色であるという理解が得られたことが示唆される。

5. まとめ

5.1. 本研究の成果

本研究では、高等学校において加法混色と減法混色から視覚について学ぶ授業実践を開発して試行した。事後アンケート結果の分析から得られた成果として以下の 2 点を挙げる。

第一に、本研究の授業実践により、子どもたちに「視覚」や「見える」とは何かという科学的知識を与えることができた点である。事後アンケートの結果から、高等学校 1 年次までに、加法混色と減法混色について深く学ぶ機会はなく、本研究で実践した加法混色と減法混色から「視覚」について学ぶ授業は、異なる教科で学んできた色彩・光・眼の構造という 3 つの知識を統合的に扱ったことで、新たな知識を得られたと生徒が感じられる学習であったといえる。

第二に、単なる演示実験ではなく「色あてクイズ」という、学習者が参加可能な形にすることの有効性を示すことができた点である。渋谷ら(2022)の先行研究の減法混色実験を実際の授業で実践する場合、クイズ形式にすることで興味・関心を高められることが示唆された。演示実験を授業に導入する際には、学習者が参加可能な形に授業をデザインすることが有効であろう。

5.2. 今後の課題

本研究での授業実践での加法混色の実験は渋谷ら(2022)の先行研究に忠実とはいえない部分があった。まず、渋谷ら(2022)の先行研究は RGB の光をスクリーンへ照射しているのに対し、本研究では黒板に直接照射した。また、プロジェクターの光は長波長の赤色が強く短波長

の青色が弱くなる性質があるため、照射する RGB 光の混色が白色光になるように色の調節が必要である。これらの準備を怠ったことで「きれいな白色光」を加法混色により得られなかった可能性がある。これらについては、授業プラン内の実験の内容を再検討し、改善をはかる必要がある。しかしながら、錐体の個人差等により「きれいな白色光」を得ること自体が難しいことから、むしろそのような光の見え方の違いを踏まえ、理論と実験の差や、観察者の個人差に言及することで学びを深めることもできる可能性がある。

また、本研究では「色あてクイズ」において物体色をあてるための実験器具として、サインペンを用いた。これは、カラーバリエーションが豊富であり、必要な色を簡単に入手することができるためである。しかし、授業の受講人数が多くなった場合、サインペンでは小さく、学習者からは見えにくい。一般化を想定した場合には、R、G、B、C、M、Y、K のカラーバリエーションが存在し、かつ大きなサイズの実験器具が適当である。

最後に、本授業実践により学習者が身についたと感じているものが、「知識・理解」になってしまった点である。「色あてクイズ」は、加法混色と減法混色の既知の知識を用いて「思考・判断」をする教材として開発した。アンケートの回答が「思考・判断」よりも「知識・理解」に偏ってしまったことについては、授業構成の問題やアンケート項目についての説明不足があったことが考えられる。

以上の 3 点については、改善と検討が必要である。

¹ 今井(2022)、p.196

² 大上・小栗(2017)、p.72

³ 今井(2022)、p.196

⁴ 今井(2022)、p.196

⁵ 平井(1971)、p.138

⁶ 今井(2022)、p.197

⁷ 大藪ら(2017)、p.237

⁸ 大藪ら(2017)、p.237

⁹ 渋谷ら(2022)、p.426

¹⁰ 渋谷ら(2022)、p.427

¹¹ 松村(2012)、p.149

¹² 松村(2012)、p.158-161

¹³ 長谷川(2007)、p.72

¹⁴ 長谷川(2007)、p.70

¹⁵ 中橋ら(2017)、p.72

¹⁶ 大上・小栗(2017)、p.72

¹⁷ 室谷(2019)、p.241

¹⁸ 室谷(2019)、p.242

¹⁹ 文部科学省(2018)、p.123

²⁰ 文部科学省(2018)、pp.103-105

²¹ 文部科学省(2017a)、p.94

²² 文部科学省(2017a)、p.95

²³ 文部科学省(2017b)、p.79

²⁴ 文部科学省(2017b)、p.79

²⁵ 文部科学省(2017b)、p.85

²⁶ 文部科学省(2018)、p.103

²⁷ 文部科学省(2018)、p.105

²⁸ 文部科学省(2018)、p.109

²⁹ 文部科学省(2018)、p.109

³⁰ 文部科学省(2017b)、p.111

³¹ 文部科学省(2018)、p.148

³² 使用した教科書は①吉里勝利ら(2023)『高等学校生物』、

pp.250-251、第一学習社、②浅島誠ら(2023)『生物』、pp.278-281、東京書籍、③嶋田正和ら(2023)『生物』、pp.232-233、数研出版の 3 冊である。

³³ 使用した教科書は①田村剛三郎ら(2023)『高等学校物理』p.178、pp.184-186、第一学習社、②國友正和ら(2023)『物理』、p.174、pp.180-183、数研出版、③前田京剛ら(2023)『物理』、pp.190-191、東京書籍の 3 冊であり、加法混色と減法混色について本文中に記述があるのは①と②、付録にのみ記述があるのは③であった。

³⁴ 使用した教科書は、①西村祐二郎ら(2022)『高等学校科学と人間生活』、pp.84-87、第一学習社、②内田浩ら(2022)『科学と人間生活』、pp.42-43、東京書籍、③河本敏郎ら(2022)『科学と人間生活』、pp.78-79、数研出版の 3 冊である。

³⁵ 河本敏郎ら(2022)『科学と人間生活』、pp.114-115、数研出版

³⁶ 西村祐二郎ら(2022)『高等学校科学と人間生活』、pp.130-137、第一学習社

³⁷ 内田浩ら(2022)『科学と人間生活』、pp.128-129、東京書籍

³⁸ 使用した教科書は、①村上尚徳ら(2022)『高校生の美術 1』、pp.152-154、日本文教出版、②酒井忠康ら(2022)『美術 1』、pp.114-115、光村図書の 2 冊である。

³⁹ 該当の教科書は①赤堀侃司ら(2023)『新編情報 I』、pp.44-45、東京書籍、②荻谷昌己ら(2022)『最新情報 I』、p.84、実教出版の 2 冊である。

⁴⁰ 坂村健ら(2022)『高等学校情報 I』、pp.59-61、数研出版

⁴¹ 該当の記述は、①赤堀侃司ら(2023)『新編情報 I』、p.123、東京書籍、②荻谷昌己ら(2022)『最新情報 I』、p.84、実教出版の 2 冊で見られた。

⁴² 文部科学省(2015)、p.18(別紙 1 枚目)

⁴³ 渋谷ら(2022)、p.427

⁴⁴ 渋谷ら(2022)、p.427

⁴⁵ 文部科学省(2018)、p.20

⁴⁶ 文部科学省ホームページ

https://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/gakuryoku/siryo/1379649.htm#:~:text=科学的リテラシーとは,を導き出す能力である%E3%80%82 (2023.12.24 閲覧)

引用文献

今井泉(2022)「科学教育における教材としての「光と色と色覚」」、化学と教育 70 卷 4 号、pp.196-199

大上稜・小栗和也(2017)「光と色の三原色を繋ぐ教材の開発」、応用物理学学会学術講演会講演予稿集第 64 回応用物理学学会春季学術講演会、p.130

大藪又茂・藤井俊・内村博和・西岡圭太・工藤知草・山岡英孝(2017)「KIT 数理講座「光と色の不思議」の開催」、工学教育研究講演会講演論文集第 65 回年次大会(平成 29 年度)、pp.236-237

渋谷優斗・大倉遥華・小川佳宏(2022)「プロジェクターを用いた加法混色実験と減法混色実験」、上越大学研究室紀要第 41 卷第 2 号、pp.423-430

中楯末三・久米祐一郎・渋谷真人・陳軍・東吉彦・森山剛

(2017)応用物理学学会学術講演会講演予稿集第 66 回応用物理学学会春季学術講演会、p.115

長谷川誠(2007)「LED を利用した光の三原色実験セットの製作と授業実践」、物理教育 55 卷 1 号、pp.70-72

平井敏夫(1971)「物体色の標準」、照明学会雑誌 55 卷 3 号、pp.138-141

松村敬治(2012)「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-」、西南学院大学人間科学論集 第 7 卷第 2 号、pp.147-165

室谷心(2019)「色の混合についての考察」、物理教育 67 卷 4 号、pp.241-243

文部科学省(2017a)「小学校学習指導要領(平成 29 年告示)」

文部科学省(2017b)「中学校学習指導要領(平成 29 年告示)」

文部科学省(2018)「高等学校学習指導要領(平成 30 年告示)」

謝辞

本研究は、千葉大学大学院教育学研究科藤川大祐教授、ならびに研究室の皆様のご指導を受けまとめることができました。また、授業実践にご協力いただいた所属校の職員および生徒の皆様は心より感謝申し上げます。