

代表的な色覚特性を考慮した炎色反応実験の提唱

～理科・化学実験のユニバーサルデザイン化～

* 渡 辺 尚・*** 須 藤 大 貴

要 旨

日本では色覚特性者は1学級におおよそ1人の割合で在籍しており、インクルーシブ教育の観点から配慮が求められる。本研究では代表的な色覚特性者の炎色の見え方を予測し、どのような授業の工夫が妥当か検討した。代表的な金属7種類の金属硝酸塩(硝酸リチウム, 硝酸ナトリウム, 硝酸カリウム, 硝酸カルシウム, 硝酸銅, 硝酸バリウム, 硝酸ストロンチウム)を用い、炎色反応実験の観測を4Kカメラで背景を変えて撮影し記録した。撮影した映像から炎色のRGB値をカラーピクツールで採取し、炎色のRGB値を刺激値XYZに変換し、XY色度図と混同色線を作成し分析を行った。結果から、一般色覚者にとってもLiとSr, CaとSrの炎色は見分けにくいことが確かめられた。そして色覚特性ごとに見分けにくい炎色の組み合わせは存在するが、そのうち背景色を変化させることで見分けやすくなる組み合わせが存在すると判明した。見分けにくい炎色の組み合わせは背景色を変化させることで色覚特性者でも炎色を見分けることが可能になることを示した。

Key words : 色覚特性, 炎色反応, カラーピック, 色度図, 混同色線

1 はじめに

人の網膜には暗いときのみ働く桿体と明るいときのみ働く錐体3種類(L・M・S)という視細胞が存在し、これらの有無や働きの差異で色覚の違いが生じる。最も該当者が多い色覚を一般色覚といい、日本人男性の約95%, 女性の約99%が一般色覚であるとされている。一般色覚以外の色覚のことを色覚特性という。色覚特性は先天的に桿体もしくは錐体が欠けることや、一般色覚者と分光感度が異なる錐体を持つことで生じる。錐体が3種類全て揃っている色覚は三色覚、3種類の錐体のうち1種類を欠失した色覚を二色覚、3種類の錐体のうち2種類を欠失した色覚を一色覚という。

視細胞のうち、長波長を感じとるL錐体(赤錐体)と中波長を感じとるM錐体(緑錐体)の遺伝情報は性染色体のX染色体に連続して存在し、塩基配列も似ているため、転写する際に比較的ミスが起こりやすい。ミスが起こった結果としてL錐体の性質が変化する

と1型三色覚, L錐体を欠失すると1型二色覚となる。また, M錐体の性質が変化すると2型三色覚, M錐体を欠失すると2型二色覚となる。これら4タイプの色覚をもつ人は日本人男性の約5%, 女性の約0.2%いるとされる。また, 短波長を感じとるS錐体(青錐体)の遺伝情報は常染色体にあるため欠失が起こりにくく, S錐体に異常がある3型色覚は日本人全体の約0.001%いるとされる。1色覚は更に稀である。

1型三色覚や2型三色覚は個人により見え方の差異が激しく一般的な見え方の予測が難しい。また, 1色覚は殆ど存在しないため, 本研究では代表的な色覚特性を1型二色覚, 2型二色覚, 3型二色覚の3種類と定める。

3種類の錐体はそれぞれ個人差があるものの比色実験によりおおよその分光感度が分かっている。三色覚者は3つの錐体がそれぞれ脳に送る信号の強度差を比較することで三次元的に色を捉え, 見分けている。一方, 錐体を1つ欠失している二色覚者は, 欠失した

* 宮城教育大学

** 仙台市立八乙女中学校

錐体から信号が脳に届かないため二次元的にしか色を捉えられず、見分けられない色が多く存在する。この2色覚者の見分けられない色は、 x y 色度図の混同色中心（1型(0.7465, 0.25351) 2型(1.400, -0.400) 3型(0.1748, 0.0)）から放射状に引かれた直線である、混同色線上に位置する。したがって、混同色線上にあるかどうかで二色覚者が見分けられる色かを判断することが出来る。 x y 色度図はCIE（国際照明委員会）によって承認されたXYZ表色系を用いて作成される、原色RGB（赤原色[R] = 700nm (nm= ナノメートル)、緑原色[G] = 546.1nm, 青原色[B] = 435.8nmの単波長）に対応した原刺激XYZの混色比を表す図である。

また、一般色覚者にも見分けられない色は存在し、その色の範囲を示した楕円をマクアダム楕円という。一般色覚者は同一マクアダム楕円内の色を見分けることが出来ない。

教育現場では、学級が男子20人女子20人の40人であるとする、1クラスにおおよそ1人の割合で色覚特性者がいると考えられるが、色覚特性を意識した授業実践例は見当たらない。しかし、文部科学省の「色覚に関する指導の資料」(2003)¹⁾で「実験、観察、実習における色または色の変化は、色の名前を黒板に書き、野外観察などでは色の名前を言って示す」とされている通り、対応が求められている。理科は他教科よりも色そのものが重要である学習内容が多く、見分けられない色が多い色覚特性の生徒にとっては理解が難しい。色を数値や文字などの色覚特性者にも認識できる情報に置き換える等、授業上の配慮をする必要がある。

そこで、本研究では色が特に重要な要素となる炎色反応実験を扱う。炎色反応実験は、平成30年告示高等学校学習指導要領(2018)によると化学基礎(1)化学と人間生活(ア)化学と物質④単体と化合物において「単体や化合物を構成している元素を確認する方法として、炎色反応～を扱う。」²⁾とされており、高校生の多くが履修する学習内容である。一般色覚者と代表的な色覚特性者が炎色をどのように感じ取っているか予測し、どのような授業の工夫が妥当か検討することで、炎色反応実験のユニバーサルデザイン化を目指す。

2 実 験

本研究では、代表的な金属7種類(Li, Na, K, Ca, Cu, Ba, Sr)の硝酸塩を用い、炎色反応実験の観測及び分析を行った。硝酸塩を使用したのは、塩化物や硫酸塩等と比較して7種類の金属元素全てでメタノールや水への溶解度を保っているためである。実験は次の手順で行った。まず、るつぼの蓋に金属の硝酸塩0.1gとメタノール1mLをそれぞれ加え、良く攪拌してから着火することで安定した炎色を得た。

次にその炎色を、背景が黒・黒板(緑)・白の3種類それぞれの場合について4Kデジタルカメラ(ボディ:LUMIX DMC-G8 レンズ:LUMIX G VARIO 12-60mm/F3.5-5.6 ASPH./POWER O.I.S. 設定:モード クリエイティブ動画, フォトスタイル スタンダード, ISO感度 800, シャッタースピード 1/100秒, F値5.6)で各条件につき3回ずつ映像を撮影した。(図1, 2, 3)また、遮光カーテンで日光を遮り、蛍光灯を点灯した状態で実験を行った。背景色をこの3種類の色にした理由は、黒と白は無彩色で炎色に直

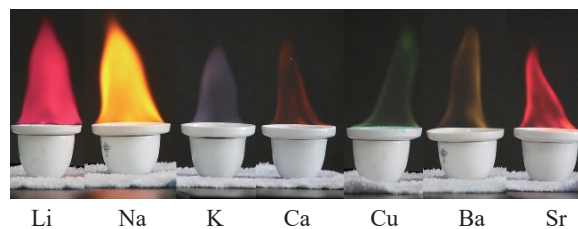


図1 炎色反応実験(黒背景)

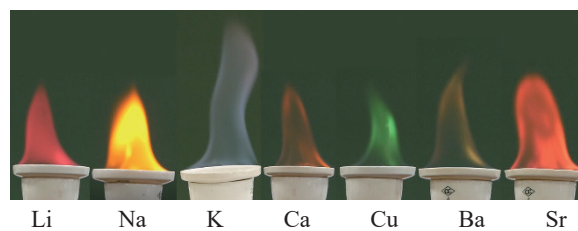


図2 炎色反応実験(黒板(緑)背景)

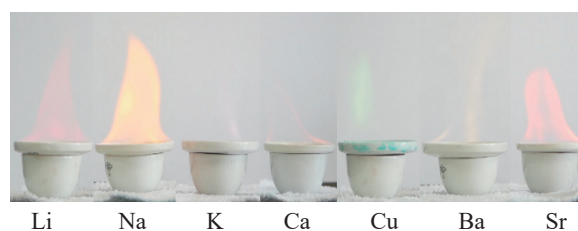


図3 炎色反応実験(白背景)

接与える影響が少ないと考えたためであり、黒板（緑）は実際の教育現場で演示実験等をする際、背景が黒板の色になる場合が多いと考えたためである。

その後、撮影した映像から炎色の RGB 値をカラーピクツールで採取した。採取は1つの映像につき炎色が明確に確認できるフレームの呈色部を選択し、3ピクセル分で行った。

続いて、採取した炎色の RGB 値を刺激値 XYZ に変換した。カメラの色空間が sRGB であるため、変換式は次のものを用いた³⁾。

$$X = 0.4124R + 0.3576G + 0.1805B$$

$$Y = 0.2126R + 0.7152G + 0.0722B$$

$$Z = 0.0193R + 0.1192G + 0.9505B$$

次に、三刺激値 XYZ の混色比 $x y z$ を求め、 xy 平面上にプロットした。変換式は次のものを用いた。

$$\left. \begin{aligned} x &= X / (X+Y+Z) \\ y &= Y / (X+Y+Z) \\ z &= Z / (X+Y+Z) \end{aligned} \right\} (1)$$

次に、XY 色度図を作成した。CIE1931XYZ 等色関数⁴⁾の波長360nm から830nm までの値を(1)式に代入し、混色比 $x y$ を求め、 xy 平面上にプロットし、スペクトル軌線を描いた。また、波長370nm と780nm のプロットを結び、純紫線を描いた。スペクトル軌線と純紫線の内側が可視光領域になる。

次に、混同色線を作成した。代表的な色覚特性者毎の混同色中心（1型(0.7465, 0.2535) 2型(1.400, -0.400) 3型(0.1748, 0.0)）のプロットと、先程計算した単色光の混色比 $x y$ のプロットを結び、混同色線を描いた。

その後、1型、2型、3型色覚の混同色線と観測データのプロットを重ね合わせて比較し、見え方を予測した。

また、一般色覚については ColorAC⁵⁾ で作成したマクアダム楕円とプロットを重ね合わせて比較し、見え方を予測した。

3 結果および考察

黒背景の実験結果を XY 色度図上にプロットしたものを混同色線およびマクアダム楕円と重ね合わせた。(図4a ~ 4d)

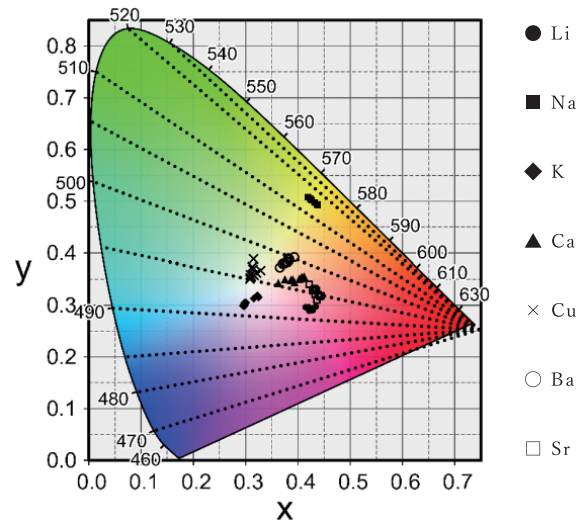


図 4 a 1 型色覚混同色線（黒背景）

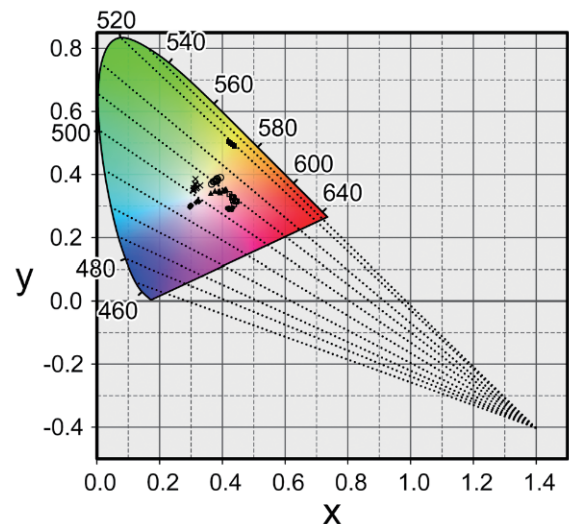


図 4 b 2 型色覚混同色線（黒背景）

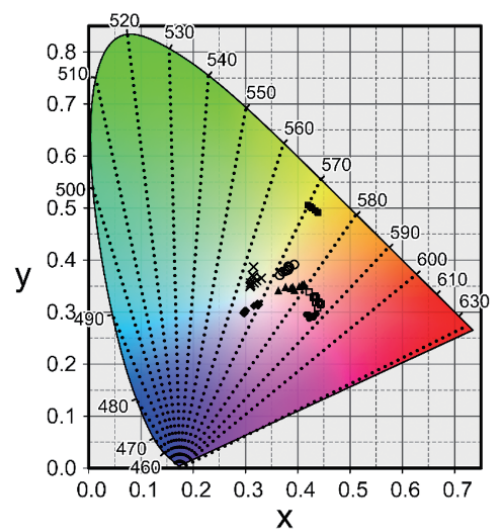


図 4 c 3 型色覚混同色線（黒背景）

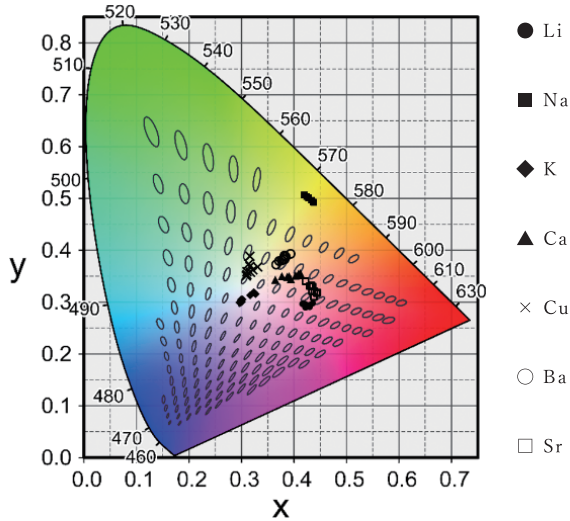


図4d マクアダム楕円(黒背景)

結果より、炎色の組み合わせについて、同一混同色線上になく見分けられると考えられるものを○、同一混同色線上に一部重なる可能性があり部分的に見分けられないと考えられるものを△、同一混同色線上にあり見分けられないと考えられるものを×で示すと、黒背景時の見え方は次のように予測される(表1, 2)。表の読み方については、表1の破線で囲われているセ

表1 1型二色覚及び2型二色覚の見え方(黒背景)

		1型二色覚						
		Li	Na	K	Ca	Cu	Ba	Sr
2型二色覚	Li	○	×	○	○	○	○	△
	Na	○	○	○	○	○	○	○
	K	○	○	○	○	○	○	△
	Ca	×	○	○	×	△	×	×
	Cu	×	○	△	×	×	×	×
	Ba	△	○	○	×	△	△	△
	Sr	△	○	○	×	△	×	×

表2 3型二色覚及び一般色覚の見え方(黒背景)

		3型二色覚						
		Li	Na	K	Ca	Cu	Ba	Sr
一般色覚	Li	○	○	○	○	○	○	×
	Na	○	△	△	○	×	○	○
	K	○	○	○	×	△	○	○
	Ca	○	○	○	○	×	△	○
	Cu	○	○	○	○	○	○	○
	Ba	○	○	○	○	○	○	○
	Sr	△	○	○	△	○	○	○

ルは1型二色覚者がKとBaを見分けられると考えられることを示している。また、太線で囲われているセルは2型二色覚者がCaとBaを見分けられないと考えられることを示している。

結果より、色覚特性によって見分けられないと考えられる炎色の組み合わせは異なると予想される。また、一般色覚者にとってもLiとSr, CaとSrは見分けにくいとこの結果は示しており、実感と一致し理に叶っている。実際に授業で炎色反応実験をする際には何らかの工夫をする必要がある。

次に、黒板(緑)背景の実験結果をXY色度図上にプロットしたものを混同色線およびマクアダム楕円と重ね合わせた。(図5a~5d)

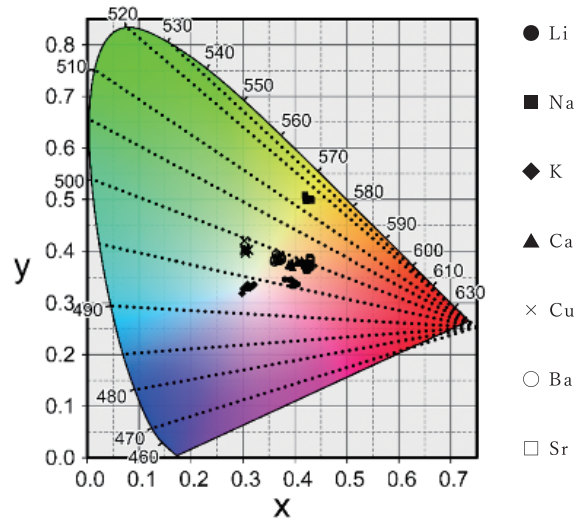


図5a 1型色覚混同色線(緑背景)

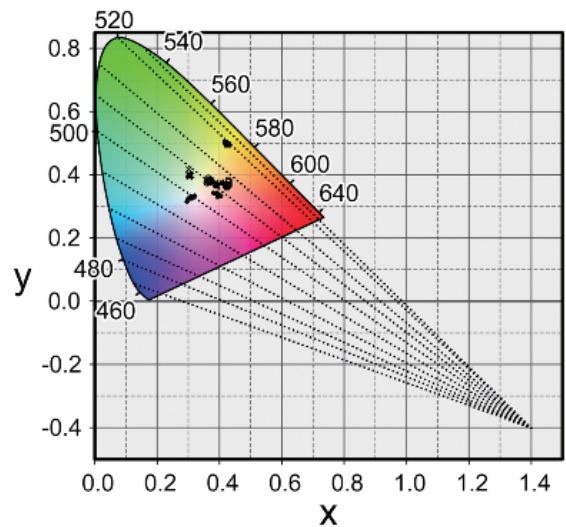


図5b 2型色覚混同色線(緑背景)

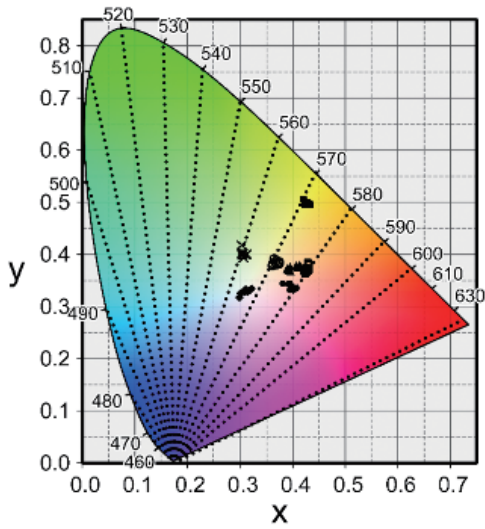


図5c 3型色覚混同色線 (緑背景)

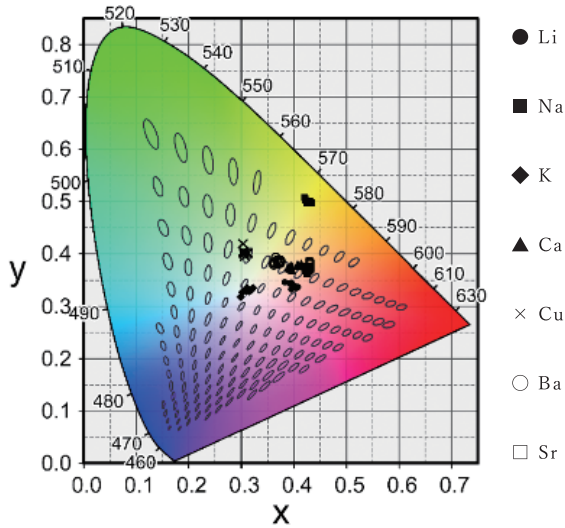


図5d マクアダム楕円 (緑背景)

図4a～4dと図5a～5dを比較すると、全体的にプロットがグラフ上方に移動している。XY色度図では上方に行くほど緑みが強くなる。また、炎は基本的に半透明であり、背景が透けて見えるため、背景の黒板の色が見た目の炎色にも影響していると考えられる。したがって、炎色反応の光と、蛍光灯の光が背景に反射してできた光が同時に目に入るため、人は炎色と背景色が混じり合った色を認識すると考えられる。

ただし、Naは発光が非常に強く、背景色が透過しなかったため殆ど結果に影響がなかったと考えられる。

また、黒板(緑)背景時の見え方は次のように予測

表3 1型二色覚及び2型二色覚の見え方(緑背景)

		1型二色覚						
		Li	Na	K	Ca	Cu	Ba	Sr
2型二色覚	Li	○	○	○	○	○	○	○
	Na	○	○	○	○	○	○	○
	K	○	○	○	○	○	○	○
	Ca	△	○	○	×	×	×	×
	Cu	×	○	○	△	×	×	×
	Ba	△	○	○	×	△	×	×
	Sr	○	○	○	×	△	×	×

表4 3型二色覚及び一般色覚の見え方(緑背景)

		3型二色覚						
		Li	Na	K	Ca	Cu	Ba	Sr
一般色覚	Li	○	○	△	×	○	○	×
	Na	○	○	△	△	○	×	○
	K	○	○	○	○	△	△	○
	Ca	○	○	○	○	○	△	×
	Cu	○	○	○	○	○	○	○
	Ba	○	○	○	○	○	○	○
	Sr	○	○	○	△	○	○	○

される(表3, 4)。黒背景時よりも見分けやすくなったと予想される組み合わせを太線で囲んだ。また、見分けにくくなったと予想される組み合わせを破線で囲んだ。

結果より、1型二色覚者は黒背景の時より緑背景の方がLiとSr, KとSrを見分け易く、CuとBa, BaとSrを見分けることが難しいと考えられる。また、2型二色覚者は黒背景の時より緑背景の方がLiとCa, LiとSr, KとCu, CaとCuを見分け易いと考えられる。また、3型二色覚者は黒背景の時より緑背景の方がKとCu, CaとBaを見分け易く、LiとCa, CaとSrを見分けることが難しいと考えられる。また、一般色覚は黒背景の時より緑背景の方がLiとSrを見分け易いと考えられる。

黒背景と黒板(緑)背景を比較すると、色覚特性によって一方の背景では見分けが難しくとも、もう一方の背景では見分け易い炎色の組み合わせが存在する。したがって、対象者の色覚と見分けさせたい炎色に合わせて背景色を変更すれば、炎色が見分け易くなる効果が望める。

最後に、白背景の実験結果をXY色度図上にプロットした。(図6)

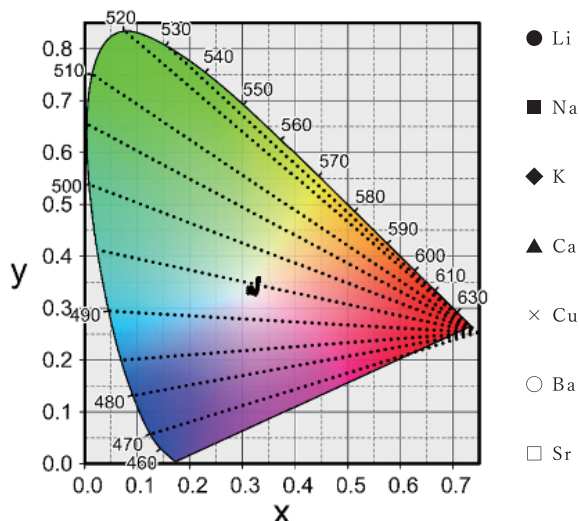


図6 1型色覚混同色線(白背景)

結果より、プロットがXY色度図中央の白色点周辺にどの元素もほとんど集中しているため、色覚特性者だけでなく一般色覚者にとっても炎色を見分けにくいと考えられる。これは、背景色の白色の影響を強く受けたためであると考えられる。XY色度図上で明度の高い白っぽい色は中央の白色点周辺に存在している。プロットのばらつきが小さくなるとそれだけ見分けることが難しくなるため、炎色反応実験では黒色や黒板の色のような明度の低い色を背景に使うのが望ましい。少なくとも、白衣を背景にして演示を行うと、炎色は見分け辛いことが明らかになった。また、実験室の床や壁の色が明度の高い白っぽい色である場合は、特に明度の低い色の背景を用意する必要がある。

4 結論

色覚特性ごとに見分けることが難しい炎色の組み合わせが存在する。しかし、その組み合わせの一部は背景色を変化させることで見分け易くすることが可能であると考えられる。ただし、背景に使う色は白色のような明度の高いものは適していない。明度の低い色を使用する必要がある。

5 謝辞

この研究は(公財)中谷医工計測技術振興財団科学教育振興助成、JSPS科学研究費助成事業基盤研究(C)(課題番号18K02975)の助成及び科学研究費助成事業基盤研究(C)(課題番号21K02877)の助成を受けて行った。

6 参考文献

- 1) 文部科学省, 色覚に関する指導の資料, 2003, 9.
- 2) 文部科学省, 【理科編 理数編】高等学校学習指導要領解説, 2018, 87.
- 3) 篠田博之藤, 藤枝一郎, 色彩工学入門 定量的な色の理解と活用, 森北出版, 2007.
- 4) CVRL, CIE functions, <http://cvrl.ioo.ucl.ac.uk/cmfs.htm> (2019, 12).
- 5) Phonon, ColorAC, <http://phonon-spectrum.com/> (2019, 12).

(令和5年2月7日受理)

Proposal of Flame Color Reaction Experiments Considering Typical Color Vision Characteristics

～ Universal Design for Science and Chemistry Experiments ～

WATANABE Naoshi and SUTO Hiroki

Abstract

Currently, approximately one student in each class is colorblind in Japan, and consideration must be given to them from the viewpoint of inclusive education. In this study, we investigated flame color vision of a typical colorblind person and determined the most appropriate teaching methods for affected students. Using seven representative metal nitrates (lithium nitrate, sodium nitrate, potassium nitrate, calcium nitrate, copper nitrate, barium nitrate, and strontium nitrate), flame color reaction experiments were conducted against backgrounds of different colors and filmed using a 4K camera. RGB values of the flame colors were collected from the captured video using a color selection tool, converted to XYZ stimulus values, and analyzed by creating an XY chromaticity diagram and confusion color lines. The results showed that regardless of color vision, it was difficult to distinguish between the flame colors of Li (lithium) and Sr (strontium), and between Ca (calcium) and Sr. For each type of color vision according to their respective color vision characteristics, combinations of flame colors that were difficult to distinguish could be more easily distinguished when the background color was changed. Even in people with color blindness, flame colors that are difficult to distinguish can be differentiated when certain background colors are used.

Key words : color vision characteristics, flame reaction, color pick, chromaticity diagram, color confusion line