

# 空中像ディスプレイを用いたバーチャルな炎色反応実験教材の研究

西元 魁<sup>†1</sup> 大島 登志一<sup>†1</sup>

**概要：**本研究では、物質の特性を理解する基本的な化学実験である炎色反応を取り上げ、元素の種類を理解することと、ガスバーナーの操作方法を安全に学ぶことができるバーチャルな化学実験教材を研究する。本システムでは、実際の実験器具であるガスバーナーにセンサ類を備えて、安全かつ実際に実験を行なっているかのような学習体験システムを開発した。また、炎を空間結像型空中像ディスプレイに表示することにより、ユーザがより現実の実験に近い体験を行うことを可能にした。

## 1. はじめに

近年、教育分野では、STEAM 型教育が提唱されるなど科学教育を重視する方向性がある。その一方で、教育現場では、実験を実際に行わない状況も増えてきているという報告もある。今回取り上げる「炎色反応」は、成分元素の検出を行う重要な実験であり、炎の色彩を観察する簡易な実験でありながら、炎を取り扱うことから、生徒による実験は行わないケースも増えている[1]。深谷の報告[1]によれば、実験の代替として各元素の炎色のカラー写真を提示することが主流となっており、炎色反応の実験動画を見せるなども増えてきていると述べられている。その原因として考えられるのは、安全性や学習時間の制約である。化学実験では器具の取り扱い方が重要であり、一定の安全対策が必要である。そのため、指導者の元で実験を行わざるを得ず、準備・片付けなどの実験前後に時間もかかり、実験を簡易化もしくは割愛するという状況となっていると考えられる。

実験などの代替として、EdTech の活用も進んできているが、身体的な学習機会が希薄となる懸念もある。諏訪による「からだで学ぶ」ことの意味 [3] の報告では、「からだで学ぶとは、自分のからだ、意識、生活、社会に関係づけてものごとを理解する行為である」と述べられている。また、中学校学習指導要領[2]や高等学校学習指導要領[4]では、記憶としての学びだけでなく、実験などを通して得られる学びが健康で安全な生活を送るために必要なことであるとしている。

本研究では、デジタルなシミュレーションによる「安全性」と「学習機会の増強」と、実験器具を取り扱うことの「身体性」を併せ持った、化学実験教材を開発することを目的とする。これによって、学習者が実体験に近い形で理解をより深められる効果を期待する。

今回開発した化学実験教材では、実際の実験器具であるガスバーナーにセンサ類を備えたデバイスによって、リア

ルな実験の体験を実現した。また、安全かつリアリティが高く、炎色反応実験がおこなえるよう、空間結像型空中像で炎を提示することとした。炎の点火と元素の選択も実際の実験のような体験となるよう、赤外線 LED とフォトトランジスタを使用したペン型デバイスを製作し、マッチによる点火と各種炎色反应用の塩化物水溶液を浸す白金線として使用するインタフェースとした。

## 2. システム構成

本システムの表示方法として、空間結像型空中像ディスプレイと情報提示ディスプレイとで分割して表示を行う。空間結像型空中像ディスプレイは、ビームスプリッタと再帰反射性シートを LCD ディスプレイと組み合わせて空中像の表示を行っている。また、実際の実験でも使用されているガスバーナー（プロパン用 1 重管コック付）とセンサ類を組み合わせ、ガスバーナーデバイスを作成した。赤外線 LED が内部に仕込まれたペン型デバイス、元素パレットデバイスもそれぞれ作成した。上記の 2 つのディスプレイ及び、3 つのデバイスを組み合わせることでシステムが構成されている(図 1)。

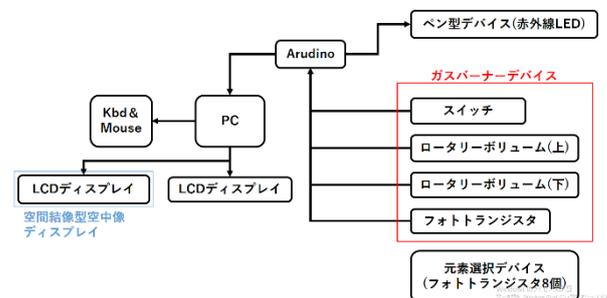


図 1 システム構成図

## 2.1 実験器具型デバイスの構築

本研究では、実際の実験に基づいた体験を提供するためのデバイス(図2)に、それらを制御するための Arduino を組み込んだ。各調節ねじを回転させることでロータリーボリュームが連動して回転する機構を組み込んだ。また、フォトトランジスタをセンサとして、元素の選択とガスバーナーの点火を行うこととした。赤外線 LED を先端に取り付けたペン型デバイスによって点火と元素選択を行う。炎を空中像にするため、ガスバーナーデバイス後方に空間結像型空中像ディスプレイを配置した。

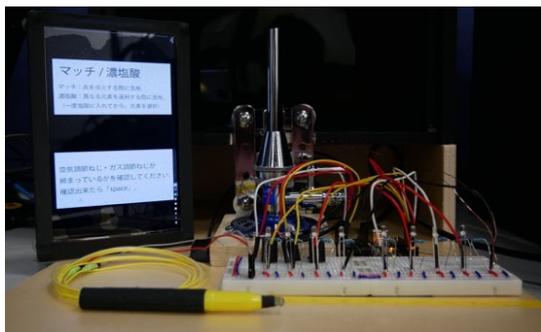


図2 デバイス全体図

### 2.1.1 ガスバーナーデバイス

実際に行われている実験に基づいた体験を提供するため、実際の実験で使用されるガスバーナー(プロパン用1重管コック付)を用いてデバイス作成をおこなった(図3-a)。また、ガスバーナーの「空気調節ねじ」と「ガス調節ねじ」にロータリーボリュームをかみ合わせて、各調節ネジの回転を取得できるようにした(図3-b)。ガス開閉のコックとしては、ひとまずスイッチを用いることで代用した(図3-c)。

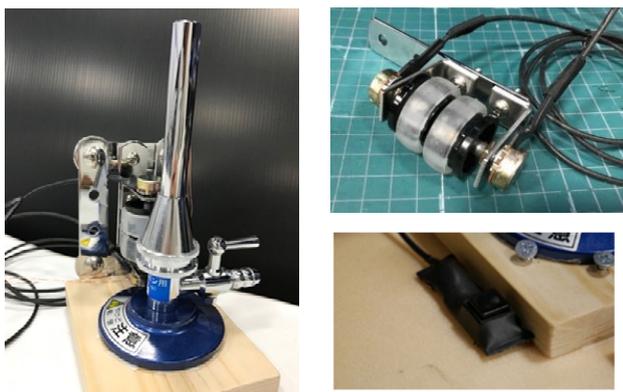


図3 (a) ガスバーナーデバイス (b) ロータリーボリューム (c) コック開閉スイッチ

さらにガスバーナーの筒内部には、フォトトランジスタを仕込んでいる(図4)。これにより、ペン型デバイスによって炎の点火を行うことができる。炎の色を変化させる際も同種のフォトトランジスタとペン型デバイスを用いている。



図4 ガスバーナーの筒内部のフォトトランジスタ

### 2.1.2 ペン型デバイス

本研究の体験手順の中には、「炎を点火する」「炎の色を変える」「元素を選択する」の3つの手順がある。実際の実験に近づけるため、赤外線 LED が内蔵されたペン型デバイスを作成した(図2内下部)。先述した「炎を点火する」「炎の色を変える」「元素を選択する」の3つの手順は、本ペン型デバイスにより操作する。

### 2.1.3 元素選択デバイス

元素選択デバイスは計8つのフォトトランジスタが組み込まれており、7つが「元素」、1つが「点火用マッチ兼洗浄用濃塩酸」で構成されている(図5)。ペン型デバイスで赤外線を照射することで選択を行う。

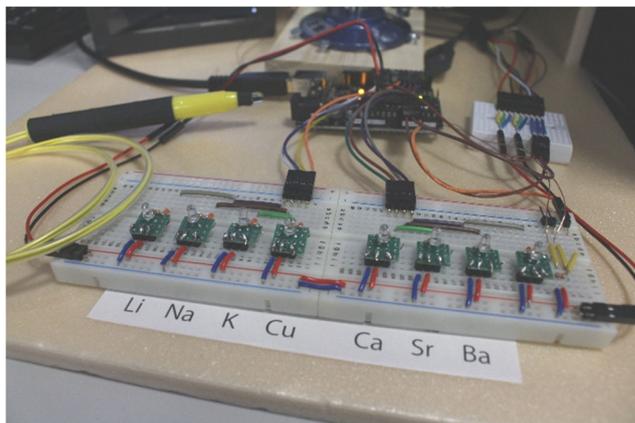


図5 元素選択デバイス

## 2.2 空間結像型空中像ディスプレイ

本研究では炎を現実的に見せる手法として空間結像型空中像を用いた。上部の LCD ディスプレイが表示する炎をビームスプリッターによって反射させ、それを再帰反射性シートによって更に反射させることで空中に炎の像を結像させている(図6)。また、本ディスプレイにより、ガスバーナーの筒先端に空中像が浮き上がって見えるよう位置を調

整している。

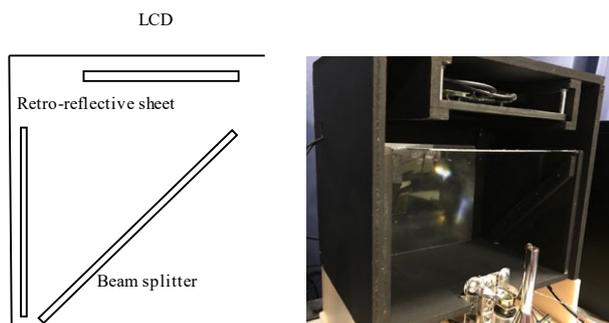


図6 空間結像型空中像ディスプレイ構造図と本体

### 2.3 炎の作成

本研究における炎は、パーティクルによって作成したパーティクルとは、「パーティクル・システム」のことを指し、一般的に粒子の運動によって構成される事象をコンピュータ上で再現するために用いられる手法である。炎もこの粒子の運動によって構成される事象に当たるため、この手法を用いた。だが、本研究は現実的な炎を作成することが目的ではないため、簡易なパーティクルを作成し、実験的に炎を再現する程度で留まっている。

#### 2.3.1 ガスバーナーデバイスに伴う炎の変化

炎の大きさ及び色は、ガスバーナーデバイスの各調節ねじの回転率によって変動し、ユーザが自由に变化させることが可能となっている。ガス調節ねじを右に回転させることで炎の大きさは大きくなり、左に回転させることで大きさは小さくなる。また空気調節ねじを右に回転させることで炎の色は青色に近づき、左に回転させることで色は橙色に近づくといい、実際のガスバーナーと同様の炎の変化を再現している。

#### 2.3.2 炎色反応に伴う炎の変化

各元素をペン型デバイスによって選択したのち、ガスバーナーデバイスに近づけることで炎の色が各元素によって異なる色の変化を見せる(図7-a, 7-b)。各元素に対応する炎の色は以下の表に示す(表1)。

表1 各元素に対応する色

元素	Li	Na	K	Cu	Ca	Sr	Ba
色	赤	黄	赤紫	青緑	橙	紅	黄緑

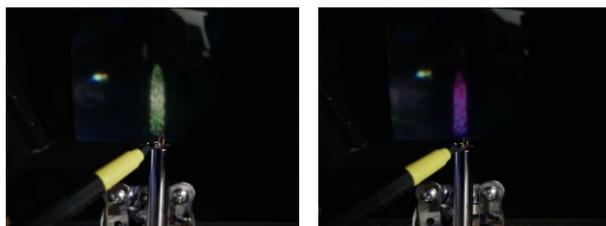


図7 (a) Naの炎色反応 (b) Srの炎色反応

### 2.4 情報提示ディスプレイ

本研究を体験してもらうにあたり、情報表示ディスプレイ(図8)上には「体験の手順(実験の手順)」,「現在の選択元素(マッチ / 濃塩酸)」,「元素の情報」が表示される。各情報は体験の進行や選択の変化によって適宜表示する情報の更新を行う。



図8 情報表示ディスプレイ

## 3. シミュレーション

実験の大きな枠組みとしては3つのフェーズに区分される。第1部では、ガスバーナーを点火するフェーズ。第2部では、炎色反応の実験を行うフェーズ。第3部では、ガスバーナーを消化するフェーズで構成される。本章では、大まかな体験のワークフローについて述べるとともに、各フェーズについて詳しく述べるガスバーナー点火(第1フェーズ)このフェーズは、ガスバーナーを点火する箇所当たる。情報提示ディスプレイ上にガスバーナーの点火手順が表示され、それに則ってガスバーナー点火までの手順を学習していく。正しいガスバーナーの点火手順の操作を行うことで、空間結像型空中像ディスプレイ上に炎が点火する。また、炎の大きさ、色の調整もここで行う。手順を間違えた場合は炎が消える、注意が表示されるなど、間違いも学習することができる。また各手順の中で、「コックが閉まる」「ガス調節ねじが締まる」「空気調節ねじが締まる」操作が見られた時、炎が消える・手順が戻るなどのシステムを組み込んでいる。

#### 3.1 炎色反応実験(第2フェーズ)

このフェーズは、炎色反応の実験を行う箇所当たる。ペン型デバイスで各元素を選択し、ガスバーナーデバイスに近づけることで、ディスプレイ上の炎の色が変化する実験を行うことができる。各元素の種類によって変化する炎の色を学習できるほか、元素の簡単な情報を提示することで元素に対する理解を深めることができる。また、異なる元素を選択する際には、濃塩酸に一度入れてから選択するといった、実際の実験に基づいた手順を実装している。

#### 3.2 ガスバーナー消火(第3フェーズ)

このフェーズは、ガスバーナーを消化する箇所当たる。ディスプレイ上にガスバーナーの消化手順が表示され、それに則ってガスバーナー消化までの手順を学習していく。

正しくガスバーナーの消化手順の操作を行うことで、ディスプレイ上の炎が消化する。しかし、コックを閉めるといった操作を行うことでも炎の消火は行われるなど、実際の実験に基づいたシステムを組み込んでいる。また各手順の中で、「コックが閉まる」「ガス調節ねじが締まる」操作が見られた時、炎が消えるシステムを組み込んでいる。手順3後は、第1フェーズから再度ガスバーナーを点火することが可能になる。

## 4. 評価実験と考察

本研究の実験目的は、本研究について以下の点を調査するために行う。

1. 本システムにおける実験は、本来の実験と相違がないか
2. 空間結像型空中像による炎の表現は実際の炎のように見られたか
3. 教科書の情報に加え、体験によって学びを深められるのか

### 4.1 実験手順

本研究の実験では1人ずつ本システムを体験してもらう。最初に、理科教科書のガスバーナー操作方法、炎色反応のページを読んでもらい、その後、本システムにおける各デバイスの説明を行う。手順に従って最後まで体験してもらった後、本システムと操作性についてのアンケートに回答してもらう。過去の経験に有無に対する質問に加え、それぞれの項目を1が「全くそうでない」で5を「とてもそう」とした5段階評価とした選択式と一部記述式でアンケートを行なった。実験対象は、立命館大学映像学部生の15人(男:10人 女:5人)である。評価実験での体験の様子を図16に示す。また、理科教科書には「三訂版【フォトサイエンス】化学図録」[5]を使用する。

### 4.2 考察

本節では、実験結果と実験概要で述べた調査項目を元に考察を行う。

#### 4.2.1 実験操作に関する実際の実験との相違

過去の実験体験についての回答結果において、全員がこれまでにガスバーナーを使ったことがあると回答している。加えて過去にガスバーナーを使ったことがある体験者の回答結果では、ガスバーナーデバイスにおけるガス調節ねじと空気調節ねじの体験は実際のガスバーナーと相違がなかったと高い評価を得られている。この結果は、ガスバーナーデバイスにおけるガス調節ねじと空気調節ねじが、実際のガスバーナーの各調節ねじを回転させる体験であったことが理由として考えられる。また、ペン型デバイスによる炎の点火も相違がなかったと高い評価を得られている。ペン型デバイスは実際に実験で使われているものではないが、マッチでの点火と同様に、ガスバーナーの下からペン型デバイスを近づけ、ガス調節ねじを回していくことで点火する体験が実際の点火と同じであったためと考えられる。

一方でコックの体験は、実際の体験と異なるといった評価が得られている。これは、ガス調節ねじや空気調節ねじとは異なり、実際のガスバーナーに備えられているコックを活用せず、本研究独自のコックを導入したためと考えられる。本研究では実際のコックを活用したデバイス開発が考案できなかったためスイッチの活用を行なったが、より化学実験の精度を高めるために、コックをどのように活用するのかを検討する必要があると考えられる。

また過去に炎色反応の実験を行ったことがあるなしに関わらず、「実際に炎の色を変える実験をしているように感じられましたか」という項目に対して高い評価が得られていたことから、炎の色を自分の意思によって変化させることができる実験という認識はされているものと考えられる。しかし、「実際に元素を選択していると感じましたか」という回答項目に対する評価は、どちらとも言えないものとなっており、元素選択デバイスの改善を検討する必要があると考えられる。

以上のことから、ガス調節ねじと空気調節ねじの操作と比べ、コックの操作は実際の実験と異なる操作となっていると言える。また、炎色反応の実験として炎の色を変化させる体験は認識されているが、元素選択の操作は未完成であると言える。

#### 4.2.2 実験手順に関する実際の実験との相違

過去に炎色反応の実験を行ったことがあるなしに関わらず、ガスバーナー及び炎色反応の実験の手順は双方ともどちらとも言えない評価となっている。全くわからないという低評価は多くないため、概要程度の手順の理解はされていると考える。しかし、本研究においてガスバーナーの扱い方及び炎色反応の実験の理解は重要視しているため、表示する情報について検討する必要があると言える。

「実際の実験より容易に体験ができると感じましたか」という回答項目に対しては高い評価を得られており、手順の提示によって容易に実験が行えるほか、安全性や柔軟性があることに対しても評価されていると考えられる。

#### 4.2.3 空間結像型空中像による炎の表現について

過去に炎色反応の実験を行ったことがあるなしに関わらず、「ガスバーナーから実際に炎が出ていると感じられましたか」、「炎は違和感なく見えましたか」という回答項目に対し高い評価を得られている。この結果は、空間結像型空中像を用いることで、炎がガスバーナーデバイス直上の空中に浮いているように見られたからだと考える。また、炎という本来手に触れることができないものを空中像として表現しているため、より空中像としての効果が高まったのだと考えられる。炎をパーティクルで表現することで本来の複雑な炎の動きを再現できたことも今回の結果の要因だと考えられる。このことから、本研究における炎の表現は実際の炎と相違はなく、安全なガスバーナーによる化学実験を行うことができると言える。

#### 4.2.4 補助教材としての学び

過去に炎色反応の実験を行ったことがあるなしに関わらず、「元素によって、炎の色が変化することが理解できましたか」、「元素によって異なる性質を持っていると理解できましたか」という回答項目に対し、高い評価を得られている。そのため、炎色反応の実験及び情報提示ディスプレイにおける元素情報は補助教材として効果的であったと考えられる。しかし、過去に炎色反応の実験を行なったことがある回答者の方がいない回答者に比べ若干低い評価が見られる。これは、過去に炎色反応の実験を行なったことがある回答者が過去に実験で提示された元素情報に比べ、情報提示ディスプレイにおける元素情報の有用性が低かったことが考えられる。より効果的な情報がどのようなものなのかを検討する必要があると考えられる。

また、「教科書だけの学習に追加して体験することで、理解度は高まりましたか」、「次回以降に本物のガスバーナーを正しく扱えると思いますか」という回答項目も同様に高い評価が得られている。この結果から、紙媒体の教科書による情報提示だけでなく、身体的な学習を行うことで理解度の向上が図れると考えられる。ただ、「次回以降に本物のガスバーナーを正しく扱えると思いますか」の回答結果にばらつきが見られることから、実際のガスバーナーとの体験の差が少しばかりかはあるのだと考えられる。

「子供に、補助教材として薦められますか」という回答項目も総じて高い評価が得られていることから、補助教材としての有用性ととともに、安全性が高い実験を行うことができる教育ツールであると考えられる。

#### 4.3 全体を通しての考察

ガスバーナーデバイスの操作性は概ね実際の実験と相違ないものとなっており、空間結像型空中像ディスプレイでの炎の表現も実際の炎に近いと意見を頂いている。中には視覚的な情報により、手元が温かいように感じるなどといった意見も見られた。実際の実験を行なっているようでありながらも、炎に対する安全性、指導教員の有無や準備などの制約がなく柔軟性も評価されていると言える。一方でコック部分の操作性に関しては指摘が多く見られ、改善が必要だと考えられる。また、選択デバイスでは主に元素の選択のしやすさ、種類の分かりにくさが指摘されており、試験管を用いた区分や LED による視認性の向上を測る必要があると考えられる。実験手順の説明に関しては、化学実験教材として機能させるためにも重要な点である。どこで操作を誤ったのか、何が間違っていたのかをケースに分けて提示することが必要であるとともに、確実に伝えることが必要だと言える。そのため、間違いを直接空間結像型ディスプレイに表示し、理解してもらった上での学習に繋げることが重要だと考える。

## 5. むすび

本研究では、物質の特性を理解する基本的な化学実験である炎色反応を取り上げ、空間結像型空中像ディスプレイと実験器具型インターフェースデバイスを用いた、炎色反応の実験による元素の理解と、ガスバーナーの操作方法を安全に学ぶことを目的としたバーチャルな化学実験教材を試作した。実験器具を元に作成したデバイスに加え、空中像で炎を表示することで実際の実験と近い体験を安全性と身体性を兼ね備えつつ実現することを意図した。

機能的な試作段階であり、実際に実験の手順を学ぶことと、またコンテンツである炎色反応について学ぶことの両方に関して、教材としての総合的な完成を目指すこととしたい。

本研究で作成した空間結像型空中像ディスプレイと実験器具型インターフェースデバイスの組み合わせは、炎を用いた実験を安全かつ容易に行うといった点では有意義と考えられる。炎色反応実験としての研究を進めると同時に、そのため、他の実験への適用も検討していきたい。

**謝辞** コンテンツや炎の表現に関するアドバイスを頂きました奥出成希教授に深く感謝を申し上げます。最後に開発中のシステムの構築、評価実験や映像撮影に協力してくれた大島研究室の皆様へ感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 深野哲也: 炎色反応にかかわる様々な話題, 化学と教育, 65 巻, 3 号, pp. 32 - 135, 2017.
- [2] 文部科学省, 中学校学習指導要領 (平成 29 年告示) 解説 理科編, pp. 130 - 134, 2018.
- [3] 諏訪正樹: “からだで学ぶ” ことの意味: 学び・教育における身体性, 慶應義塾大学湘南藤沢学会, 12(2), pp. 9 - 18, 2012.
- [4] 文部科学省, 高等学校学習指導要領 (平成 30 年告示) 解説 理科編 理数編, pp. 82 - 95, 2019.
- [5] 星野泰也, 数研出版編集部: 三訂版【フォトサイエンス】化学図録, p. 17, p165.