

化学教育における 3D デジタル教材の開発と実践研究

* 笠井 香代子・** 反畑 爽・*** 若生 晶
**** 佐々木 碧斗・***** 中久保 萌織

要 旨

学校教育現場における 1 人 1 台端末の整備と 3D プリンタの導入が推進される中で、これらの活用法や教材等に関する知見が求められている。本研究では、3D プリンティングにより学校教育現場での授業で広く使用できる包括的な教材を目指して、実験器具を 3D CAD ソフトウェアにより設計し、熱溶解積層方式 3D プリンタにより PLA フィラメントで造形した。このフィラメントで作製した器具は、中学校で使用する 1.5 mol/L HCl、1.5 mol/L NaOH、エタノールに対して耐薬品性があることを確認できた。また、小学校理科で使用する試験管ホルダーを作製し、大学の授業で使用した。受講生のアンケート調査によりこの教材の有用性が示唆された。次に 3D プリンティングや ICT 端末での閲覧ができる分子や結晶構造の 3D デジタルデータを教材として作成した。メントールとスクロースの異性体の分子構造模型を、光造形方式 3D プリンタにより安価に作製できた。リモネンの分子構造の 3D データより Web3D/AR 教材を開発し、大学の授業で使用した。受講生のアンケート調査によりこの教材が立体構造の理解を進めることが示唆された。

Key words : 3D デジタル教材, 3D プリンタ, 化学教育, 分子模型, Web3D/AR

1 はじめに

2019年に文部科学省が提唱した GIGA スクール構想により 1 人 1 台端末が整備され、2021 年度末時点で義務教育段階において 98.5% の自治体等で達成された(文部科学省, 2022)。2016 年改訂の学習指導要領(高等学校は 2017 年)で重視されている「主体的・対話的で深い学び」の実現のためにも、ICT 端末の活用が期待されている(文部科学省, 2018)。この新学習指導要領に応じた中学校教材整備指針には技術に 3D プリンタが追加され(文部科学省, 2019)、活用法や教材等に関する知見が求められている。

このような背景より、筆者らは 3D デジタルデータの教材への展開に注目してきた。これらのデータは立体物の形状をパソコン、スマートフォン、タブレッ

トなどの ICT 端末上で表現しているファイルであり、3D プリンティングや ICT 端末上での閲覧や回転、さらには VR や AR などの基になるデータである。

立体模型やモデルの使用が多い理科教育、特に眼に見えない原子や分子の可視化に課題を抱える化学教育において、これまで様々なモデルや模型が使用されてきた。例えば、分子模型として広く学校で使用されてきたのは、原子を球、結合を棒で示す組立式の球棒模型(ball and stick model)で、入手しやすい市販品としては HGS 分子構造模型(丸善)が代表的なものの 1 つである。しかし、最も安価な有機化学入門用のセットでも 1,600 円(税別、2023 年 9 月現在)で、授業などで学習者全員分を揃えることが難しい場合がある。また、このセットで複雑な分子構造を組み立てるには球や棒の数や種類が不十分であったり、分子構造の組み立てや片

* 宮城教育大学教育学部
** 宮城教育大学教職大学院
*** 仙台市立大野田小学校
**** 岩沼市立岩沼小学校
***** 宮城県宮城野高等学校

付けに時間がかかったりするなどの問題もあった。そこで、分子や結晶の立体構造を立体物のデジタルデータとして作成すれば、ICT 端末での閲覧や3D プリンティングで児童生徒などの学習者が利用できる十分な数を提示でき、教育効果が高められると期待できる。

3D プリンティングは分子模型だけではなく、実験器具の設計にも有効であると期待できる。小学校理科から高等学校化学においては、授業で様々な実験器具を必要とするが、市販品が必ずしも最適とは限らない。個々の事情に応じた大きさや形状の器具を3D CAD ソフトウェアで設計し、デジタルデータを3D プリンタで造形できれば円滑な授業の実施に役立つと考えられる。さらには、これらの実験器具の3D データを Web サイトで公開すれば、ダウンロードして3D プリンタで造形して使用できる。これまで主に大学の化学教育で使用する実験器具の設計と3D プリンティングについて報告されているが(下村,2023)、小学校から高等学校までの授業で広く使用できる包括的な3D プリンティングに関してはほとんど報告されていない。

本研究では、学校教育現場で指導者や学習者が容易に使用できる分子模型や実験器具などの立体データを作成し、3D デジタル教材を開発した。これらを基に3D プリンタで造形したり、学習者が ICT 端末での Web ブラウザで3D データを閲覧したり回転したりできるように、Web3D と WebAR の環境を備えた Web サイトを整備した。さらに、実践研究としてこれらの教材を大学の授業で使用し、参加者のアンケート調査より教材の有効性を検討した。

II 実験器具と分子構造模型の3D デジタル教材の作成

3D プリンティングやパソコンを含む ICT 端末で閲覧するための3D デジタルデータは、特定のソフトウェアに依存しない中間ファイルで出力する必要がある(水野ほか, 2019)。3D デジタルデータの標準的な中間ファイルの形式の1つが STL ファイルで、3D プリンティング用に配布されているファイルはほとんどがこの形式である。そこで、3D プリンティングを目的とした分子模型や実験器具などは STL ファイルで出力した。

一方で、STL ファイルには表裏の方向や色の情報は含まれていない(柳生ほか, 2017)。分子模型では

原子を色により区別しており、例えば先述の HGS 分子模型では、水素が水色、炭素が黒、酸素が赤、窒素が青である。3D デジタルデータの分子模型においても同様に色がついている必要がある。これに加えて、Web ブラウザ上で移動や回転などの動作が可能なファイル形式である必要がある。これらを総合的に勘案して、Web ブラウザで使用する分子模型や結晶構造は GLB ファイルで出力した(伊藤, 2023)。

III 3Dプリンタによる実験器具の開発と実践研究

1. 方法

実験器具の3D デジタルデータの設計には、クラウドベースの3D CAD ソフトウェア Fusion 360 (Autodesk 社) の教育機関ライセンスを使用した。Fusion 360 のような3D CAD ソフトウェアでは、基準平面上に描いた図面からの押し出しや回転などで立体の形状を作成する。また、球形は中心点と直径を指定して作成する(図1)。このように作成した3D CAD データを STL ファイルで出力した。

3D プリンタによる造形には、熱溶解積層(FDM/FFF)方式(Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication)の Ender-3 あるいは Ender-3 Pro (Creality 社) により、直径1.75 mm の PLA フィラメントを使用した。これらは低価格で汎用の3D プリンタとして学校教育現場で広く導入されている方式である。PLA フィラメントは最も汎用性が高く、比較的低温で造形でき、熱による変形が少なく強固であるため(柳生ほか, 2017)、実験器具の作製にこのフィラメントを選択した。STL ファイルからサポート材を含めて3D プリンタに応じた制御ファイルに変換するスライサーソフトウェアとしては、Cura 4 (UltiMaker 社)を使用した。

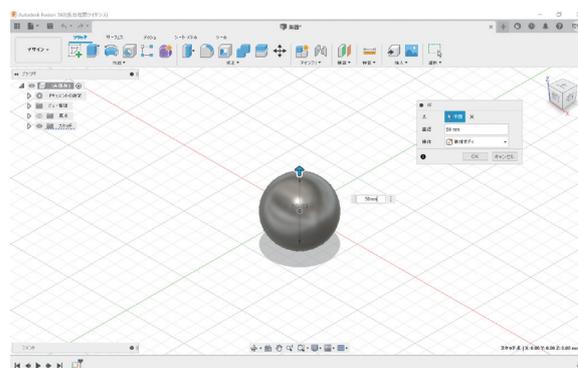
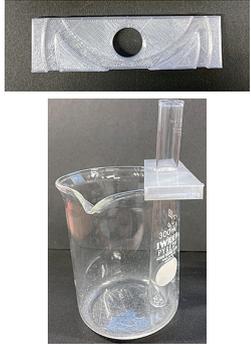


図1 Fusion 360による球の作成の画面

表1 3D プリンタで作製した実験器具

	ピペット台	試験管立て※※	試験管ホルダー
寸法/mm	W 125 × D 75 × H 18、t = 3	W 87 × D 45 × H 80	W 100 × D 28 × H 7
造形時間	3時間10分	7時間	1時間9分
フィラメント量	25 g	35 g	8.2 g
コスト※	75円	105円	25円
写真			

※ PLAフィラメントの価格を3,000円/kgとして算出し、サポート材を含む
 ※※ 3分割して造形し、瞬間接着剤で固定した

2. 結果と考察

2-1 3D プリンタによる実験器具の作製と耐薬品性

表1に3Dプリンタで作製した実験器具の一覧を示す。これらの器具をノズル径0.4 mm、積層ピッチ0.2 mm、充填率5%で造形した。

表1左のピペット台は、厚さ3 mmの長方形の短辺をコの字型に折り曲げた形状である。この折り曲げた両側の部分に、11 mm間隔で直径6 mmの半円のくぼみがあり、ピペットやガラス棒などの長い器具を6本置くことができる。市販品でこの寸法のピペット台が見当たらなかったため、このピペット台を設計した。

表1中央の試験管立ては、18×18 mmの正方形の格子が8個あり、直径15 mm、高さ100 mm程度の小型試験管用として設計した。この構造は写真のように空間が多く、このまま3Dプリンティングをするとサポート材を多く必要とするため、3分割して造形し、瞬間接着剤で固定した。

表1右の試験管ホルダーは、試験管をビーカーの中央あるいは内壁沿いに垂直に立てるために設計した。穴の大きさは直径17 mmで、直径15 mm、高さ150 mm程度の中型試験管に対応している。上の写真のように板に3つの円弧形の溝があり、ビーカーの縁を合わせて置く。長い円弧を使うとビーカーの内壁に、短い2つの円弧を使うとビーカーの中央に試験管を垂直に立てることができる。この器具は、小学校4年理科の「水の三態変化」で、水から氷をつくる実験で使用するこ

とを想定している。この実験では、氷と食塩の混合物を寒剤として、試験管に水道水と赤液棒状温度計を入れ、温度変化を観察する。冷媒が入ったビーカーから試験管を取り出すことなく観察するため、教科書では試験管をビーカーの内側につけるように指示されている(毛利ほか, 2020)。しかし、実験をすすめていくと氷が解けて試験管が自立せずに傾いてしまうことがあった。この試験管ホルダーは、試験管を所定の位置に固定するのに役立つと期待される。表1の写真の300 mLビーカー用のほかに、500 mL用の器具も設計した。

これらの器具を実験で使用するにあたり、耐薬品性を検討した。直径30 mm、高さ25 mm、厚さ2.5 mmの円筒容器をFusion 360で設計し、eSun社のSilk PLAフィラメント(ライトブルー)で作製した容器に薬品を入れて放置し、様子を観察した。薬品として、中学校の教科書で扱われる酸性の塩酸(1.5 mol/L HCl)、塩基性の水酸化ナトリウム水溶液(1.5 mol/L NaOH)、エタノールの3種類に、比較のため水道水とベンゼンを加えて実験を行った。

結果を表2、図2、図3に示す。表2では、変化がなかったものを○、変化があったものを×とした。水道水、HCl、エタノールでは、24時間放置しても容器に変化がなかった。NaOHでは、図3a)のように24時間放置すると容器の内部が変質して白くなったが、6時間であれば変化がなかった。ベンゼンでは、1時

間放置すると容器の一部が溶けて中の液体が青色になり、容器の外側にしみ出してきたので、実験を終了させた(表2、図3b))。これらの結果から、ベンゼンのような有機溶媒を除き、長期的に薬品を保存するような用途でなければ、通常の数時間での実験で使用できると見込まれる。特に、中学校までの範囲においてはアルコール以外の有機溶媒はほとんど扱わないため、PLAで作製した器具は中学校の授業などで問題なく使用できることが明らかとなった。

表2 PLAフィラメントの薬品への耐性

放置時間	水道水	1.5 mol/L HCl	1.5 mol/L NaOH	エタノール	ベンゼン
1時間	○	○	○	○	× 一部溶解
6時間	○	○	○	○	
24時間	○	○	× 一部変質	○	

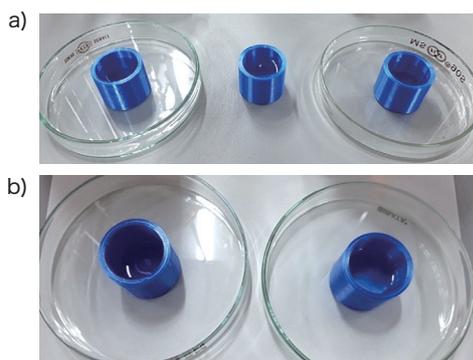


図2 耐薬品性の実験の様子 a) 左から HCl、水道水、NaOH
b) 左からベンゼン、エタノール

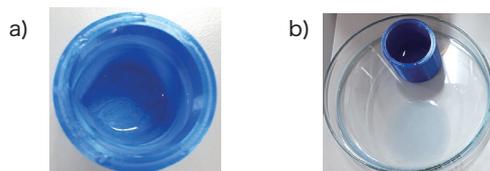


図3 薬品により変化した様子 a) NaOHを入れ24時間放置
b) ベンゼンを入れ1時間放置

2-2 教材の実践研究

表1の試験管ホルダー(300 mL用)を用いて、大学生を対象とした授業で、小学校4年理科「水のすがたと温度」の単元に関して水を冷やす実験を行った(毛利ほか, 2020)。実験方法は文献の教科書におおむね従った。

授業の終了後に、Google フォームによるアンケート調査を行った。詳細は以下のとおりである。

実施日: 2023年1月24日
授業名: 理科d (宮城教育大学 小学校教科専門科目)
主な対象者: 初等教育教員養成課程 教育学コース、国語コース、美術コース 2年生
人数: 35名
アンケート回答数: 22名

図4に教材を用いている様子を示す。アンケート調査の質問項目は以下のとおりである。

質問1: 3Dプリンタで作成した器具を使用すると実験がやりやすかったですか?器具を使わない場合と比較して5段階で評価してください。
質問2: 3Dプリンタで作成した器具について、感想や改善点などを自由に記入してください。

質問1の回答を図5に示す。肯定的な回答が86.3%で、評価平均は5段階で4.4と高評価であった。

質問2の自由記述での回答は以下のとおりであった(一部)。

- ・試験管が自立することによって安定して実験できた。ピーカーの壁面と試験管の距離もちょうどよかったと思う。(同様の回答が複数)
- ・ピーカーの中心で固定する方は少し滑りやすかった。器具が浮いてしまうことがあったので、凹みをもっと深いと使いやすいと思った。
- ・試験管を支える器具としてとても画期的なものだなと思いました。小学生でも簡単に使える点も良いなと感じました。(同様の回答が複数)
- ・ピーカーにしっかりとハマって使いやすかったです。温度計と重なって結果が見えづらいところがあったので、目で温度を直接確認できる切れ目(Cみたいな感じ)があるとさらに使いやすいと感じました。

アンケート結果より、この器具は実験の最中にピーカーの所定の位置に試験管を固定できることが明らかとなった。一方で、温度計の目盛りが器具と重なり読みにくいという意見があった。これに関しては温度計の高さを適切な位置に調節できるように、ピーカーの大きさを変えたり、教科書と同じように温度計の液だめにストローを付けたりするなどの改善が必要と考えられる。



図4 試験管ホルダーを用いた授業の様子

3Dプリンタで作成した器具を使用すると実験がやりやすかったですか？器具を使わない場合と比較して5段階で評価してください。

22件の回答

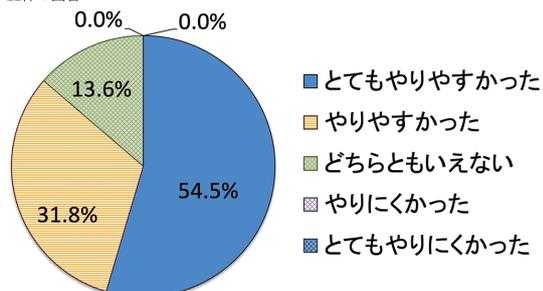


図5 アンケート結果 (回答数22名)

IV 分子構造模型教材の開発と実践研究

1. 方法

分子構造模型教材の3D デジタルファイルは、X線結晶構造解析データや分子構造描画ソフトウェアなどから作成した。X線結晶構造解析では物質の構成元素の三次元的位置を知ることができるため、現在の科学技術で物質の構造を明らかにできる最適な方法である。本研究室でX線結晶構造解析を行ったり、無料でダウンロードできるデータベースから得た結晶構造データ (CIF ファイル) を結晶構造描画ソフトウェア CrystalMaker X (CrystalMaker® Software社) で可視化や編集をしたりして、3D デジタルデータとして出力した (図6)。結晶として得られない物質などで CIF ファイルを入手するのが困難なものについては、CrystalMaker のライブラリデータを基にしたり、描画や最適化の機能などを使用したりして分子構造3D データを作成した。その後中間ファイルへの変換を行い、3D プリンタ用としては STL ファイルで、Web ブラウザ用としては色の情報を含む DAE ファイルで出力した。この DAE ファイルを3D CG ソフトウェアの Blender 3.3 LTS (Blender Foundation) により GLB ファイルに変換した (佐々木ほか, 2022)。これを Web3D/AR で閲覧するために、<model-viewer> (Google社) を通じて開くように HTML ファイルを

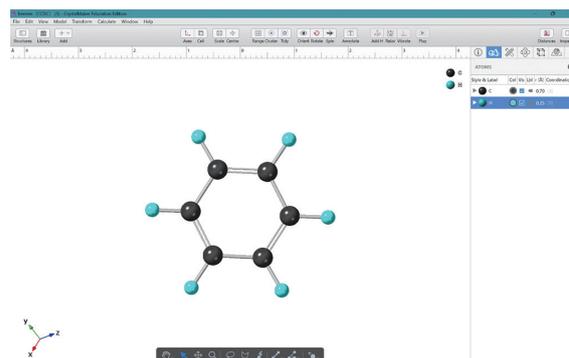


図6 CrystalMaker によるベンゼンの分子構造の作成の画面

作成し、GitHub にアップロードした (佐々木ほか, 2022)。これらの3D デジタル教材は、ICT 端末の機種や OS に関わらず、model-viewer に対応している Web ブラウザであれば表示できる。

3D プリンタによる造形には、光造形方式の Photon Mono SE あるいは Photon Mono X (Anycubic社) で、スライサーソフトとして Photon Workshop V. 2.1 (Anycubic社) を使用した。この機種は紫外線 LED を光源として二次元に並べ、LCD パネルで紫外線の透過・遮蔽を制御し、UV レジンを選択的に硬化させる。FDM方式に比べて、分子構造の球棒模型のような精密な立体物の造形が可能であるため、この方式を選択した (山口, 2021; 大宮ほか, 2022)。

2. 結果と考察

2-1 3D プリンタによる分子構造模型教材の作製

図7に3Dプリンタで作製した分子模型を、図8に模型を作製したメントールとグルコースの構造式を示す。これらは高等学校化学で扱われることがあり、どちらも異性体が存在して立体構造を区別するのが難しい。主に高等学校化学での実践を目指すために、これらの分子模型を作製した。図7a)はメントールで、-と+のエナンチオマー (鏡像異性体) が存在する。天然のハッカやミントに含まれ、特有の冷涼な香りがあるのは (-)-メントールである。図7b)はグルコースの六員環構造で、3D プリンティングの後に酸素原子を赤色のアクリル塗料で着色した。六員環を構成する酸素の隣の炭素に結合している-OH (ヒドロキシ基) と-Hの向きの違いにより、左の α と右の β の異性体が存在する (図8の黄色の部分)。これらの3D データは、CrystalMaker のライブラリデータより入手した。グルコースに関しては、 α と β で異なる構造の部分以

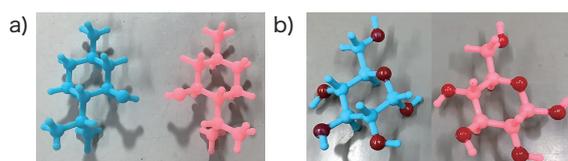


図7 光造形3Dプリンタで作製した分子構造模型
a)メントール 左:-, 右:+
b)グルコースの六員環構造 左: α 右: β

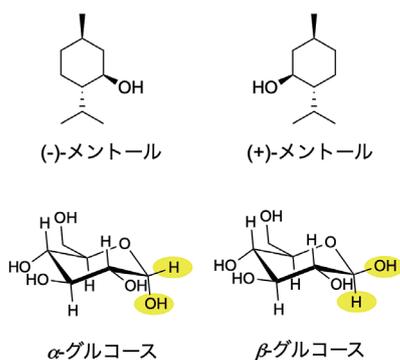


図8 メントールとグルコース六員環構造の構造式

外を同じ配置にするため、CrystalMakerの最適化機能を使用した。

3Dプリンティングによるメントールの模型は55×35×27 mmで1.75 g、グルコースの模型は55×40×25 mmで1.57 gの大きさで造形された。UVレジン の価格を5,000円/kgとして、サポート材を含めてコストを算出すると、それぞれ10.8円と10.3円であり、安価に作製することができた。

3-2 分子構造模型のWeb3D/AR教材の実践研究

先述の(-)-メントールと(+)-メントールのような鏡像異性体は、学習者にとって構造を理解するのが困難な例の1つである。本研究で開発したWeb3D/AR教材が、このような分子構造の理解に有効かどうかを、大学生を対象とした授業で使用して実践研究を行った。受講生は大学の指定パソコンを備えて授業を受け、必要に応じてスマートフォンやタブレットを使用した。詳細は以下のとおりである。

実施日：2023年1月17日
授業名：理科内容基礎講義（化学A）（宮城教育大学 中学校・高等学校理科 教科専門科目）
主な対象者：中等教育専攻理科、初等教育専攻 1年生
人数：27名
アンケート回答数：27名

この授業では鏡像異性体である(+)-リモネンと(-)-リモネンの分子構造のWeb3D/ARを扱った。(+) -

リモネンはオレンジ油の主成分で、オレンジ果皮様香気をもつ。(-)-リモネンはハッカ油、スペアミント油に含まれ、(+)-リモネンとは異なる特有の香気をもつ。これらのリモネンの構造式を図9に、Web3Dの画面を図10に示す。図9の*は不斉炭素原子で、4個の炭素に結合する原子や原子団(基)がすべて異なり、これが鏡像異性の由来である。

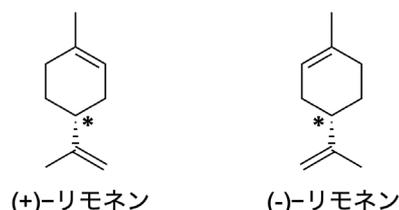


図9 リモネンの構造

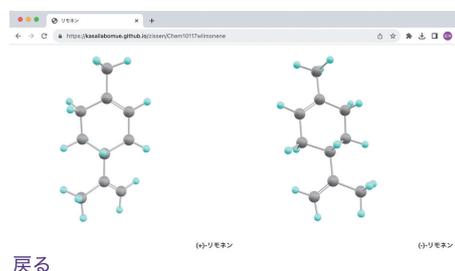


図10 リモネンのWeb3Dの画面(macOS、Google Chrome)

これらの教材を使用する前に、この不斉炭素原子に関して説明し、HGS分子構造模型を組み立てる演習を行った。その後図10のWeb3Dや図11のWebARのURLを提示し、受講者はパソコンやスマートフォンなどのICT端末上でリモネンの分子構造を回転させて閲覧した。図10のWeb3Dは主にパソコン用であり、ブラウザ上で右の(+)-リモネンと左の(-)-リモネンの構造を並べて閲覧や回転ができるようにした。図11のWebARは主にスマートフォンやタブレット用であり、閲覧者の実在の風景に分子模型を重ねて表示することができる。図b)では大学内のドアを背景にしているが、受講者は各自の環境に応じたAR表示で閲覧していた。授業ではこれらのWeb3D/ARの体験だけではなく、(+)-リモネンと(-)-リモネンを配付してにおいの違いを確認した。最後に回答としてリモネンの不斉炭素を赤で表したモデルを示した(図12)。

授業の終了後にGoogleフォームによるアンケート調査を行った。表3と表4に質問内容と回答を示す。

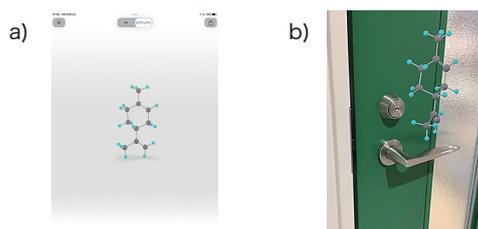


図 11 (+)-リモネンの WebAR の画面 (iPadOS、Safari)
a) オブジェクト表示 b) AR 表示

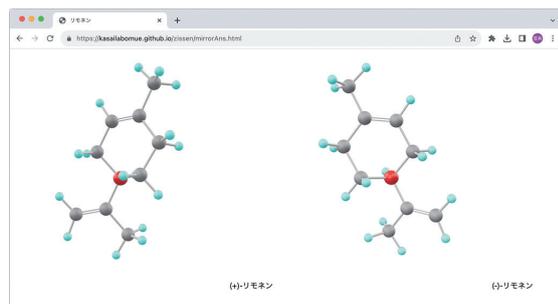


図 12 不斉炭素原子を赤で表したリモネンの Web3D 画面 (macOS、Google Chrome)

表 3 Web3D/AR のアンケート結果 (5段階、回答数 27 名)

質問	評価平均
Web3Dモデルの使いやすさはどうでしたか?	4.10
WebARを使用して(+)-リモネンと(-)-リモネンの構造の違いが分かりましたか?	4.44
WebARを用いてリモネンの不斉炭素を見つけ、(+)-リモネンと(-)-リモネンが鏡像異性体であることが分かりましたか?	4.41

表 4 Web3D/AR のアンケート結果 (記述、一部)

WebAR を使用して (+)-リモネンと (-)-リモネンの構造の違いが分かりましたか? よろしければ理由を教えてください。
<ul style="list-style-type: none"> ・不斉炭素原子が赤く表示されていたので、その周りを比べることでわかった。 ・いろいろな方向から自由に観察できる上、色もついていてわかりやすかった。 ・構造モデルを作るとなると、パーツを床に落としてしまったり工作的な面で面倒だが、好きに動かせる 3D モデルなので自分で好きな方向に動かして観察できたり水素を手前側に見た時に〜の辺り (原文ママ) の説明なども分かりやすかったから ・実際に自分で分子模型を組み立てているかのように炭素や水素が手前や奥に立体的になっていてわかりやすかったから。
WebAR を用いてリモネンの不斉炭素を見つけ、(+)-リモネンと (-)-リモネンが鏡像異性体であることが分かりましたか? よろしければ理由を教えてください。
<ul style="list-style-type: none"> ・横並びにしてあることで発見しやすかったから。 ・自由にモデルを操作できて鏡像異性体を理解できたから。 ・いろいろな方向に回して確かめることで鏡像異性体であることが分かった。
Web3D モデルで見てみたい化学物質は何かありますか?
<ul style="list-style-type: none"> ・錯イオン ・糖類やタンパク質などの複雑な物質 (同様の回答が複数) ・船型のシクロヘキサン ・3D モデルで化学反応が起こっているときの電子の移動の様子が見てみたいです ・タンパク質 ・ヌクレオチド ・有機化合物全般を見てみたい。構造が複雑な脂肪酸系統も、3D モデルにすることで、わかりやすくなると思う。
感想や意見等ありましたらご記入ください。(授業全体のレポートより本教材に関する記述を含む)
<ul style="list-style-type: none"> ・横並びにすることで違いがとても見やすかったです。 ・ニューマン投影図の理解をするのにも使えると思いました。 ・これまでは実際に模型を使うことでしか物質の構造を把握することができなかったため、学校でのみ構造把握ができなかったけれども、web でも構造を見ることができると、学校以外の場所でも学ぶことができると思いました。 ・とても見やすいと感じました。これからほかの分子構造も 3D で観察できるようになってほしい。 ・複雑な立体構造を持つ物質であればあるほど役立つツールではないかと思いました。 ・今回見たのは組み立てられているリモネンであったけれど、実際に自分が組み立ててみたいと思う化学物質を Web3D (原文ママ) モデル上で組み立てることができたらさらに好奇心が湧くと思った。 ・不斉炭素に色を付けてある解答の AR での理解が深まったため、この分野が苦手な児童・クラスなどは WebAR を用いた活動において解答を見る時間が長くとったほうがいいのかも感じました。 ・リモネンの鏡像異性体についてイメージがしやすかった。ほかの鏡像異性体についても見てみたいと思った。 ・鏡像異性体などだけでおしまいでこんなに違いが生まれるのかと驚いた。(同様の回答が複数) ・鏡像異性体の 4 年生の方のお話を聞いて、より理解ができました。(同様の回答が複数)

評価を求めるものに関しては 5 段階評価として、「最もよい」を 5、「最も悪い」を 1 とした。

表 3 の分子構造の使いやすさや理解に関しては、いずれも 5 段階評価で評価平均 4 以上であった。また、様々な質問での自由記述でも、「わかりやすい」「楽しい」「ほかの分子の構造を見てみたい」など、肯定的で学習意欲が向上した旨の記述が多く見られ、Web3D/AR が分子構造の理解を進めることが示唆された。

今回は以下の 2 つの工夫が分子構造の理解につながったと考えられる。1 つ目は、図 10 や図 12 のように、パソコンで (+)-リモネンと (-)-リモネンの 2 つの構造を並べて表示して、それぞれ自由に回転できるように Web サイトを設計したことである。2 つ目は、これらのモデルが色付きの GLB 形式であることの効果で、授業の最後に不斉炭素原子をほかの炭素と異なる色で表した図 12 のモデルを提示したところ、不斉炭素を中心として鏡像異性体を理解することができたという回答が 4 件見られた。リモネンは炭素と水素のみを含む炭化水素で、通常はすべての炭素を同じ色で示すが、必要に応じて色分けをすることで学習効果が高まることが示唆された。

V おわりに

本研究により開発した3D デジタル教材と大学での授業による実践研究より、小学校から大学までの様々な教育機関で活用できる可能性が示された。3D プリンタは高精度で低価格な機種が次々と発売され、学校でも導入の動きがあるものの、実際の活用となるといまだに課題が多い。本研究では立体物の3D データだけではなく、直接ダウンロードして3D プリンティングできるファイルも Web サイトで公開しており、これらの活用を期待している。また、Web3D/AR教材は、授業で示されたように ICT 端末の種類や OS に関わらず Web ブラウザで閲覧できるため、分子や結晶構造の模型を十分に備えていない環境でも活用できる。参加者へのアンケート調査からも様々な物質の Web3D/AR教材が期待されており、今後も教材の開発と実践研究を重ねていく予定である。

VI 付記

本稿は、佐々木碧斗、若生晶、中久保萌織、反畑爽、笠井香代子(2023)「化学教育における3D デジタルコンテンツの教材化と実践」『令和5年度化学教育研究協議会東北大会講演予稿集』p. 586をもとに大幅にデータを追加した上で加筆修正したものである。

実験器具の STL ファイルと、スライサーソフトから出力された G-code ファイルも、ともに3D デジタル教材として以下の Web サイトで公開している。
宮城教育大学 笠井研究室 3D プリンタ教材
<https://sites.google.com/staff.miyakyo-u.ac.jp/crystals/3D-printer>

分子模型の3D データの一部は、Web3D/AR で閲

覧できるように以下の Web サイトで公開している。

宮城教育大学 笠井研究室 物質構造ライブラリ
<https://staff.miyakyo-u.ac.jp/~kasai/library/>

VII 文献

- 伊藤貢司(2023):航空機操縦教育でのデジタルトランスフォーメーションの取り組み、桜美林大学研究紀要 自然科学研究第2号、p. 1-18.
- 水野操、毛利宣裕(2019):実践で学ぶ! Fusion 360 ロボットのモデリングから3D プリントまで、ジャムハウス。
<model-viewer> Easily display interactive 3D models on the web & in AR:<https://modelviewer.dev/> (参照2024.1.4)
- 文部科学省(2018):主体的・対話的で深い学びの実現に向けた ICT 活用の在り方と質的評価 https://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/micro_detail/_icsFiles/afieldfile/2018/06/11/1400884_3_1.pdf (参照2023.9.29)
- 文部科学省(2019):中学校教材整備指針 https://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/detail/_icsFiles/afieldfile/2019/08/06/1316723_4_2.pdf (参照2023.9.29)
- 文部科学省(2022):義務教育段階における1人1台端末の整備状況(令和3年度末見込み) https://www.mext.go.jp/content/20220204-mxt_shuukyo01-000009827_001.pdf (参照2023.9.29)
- 毛利衛、大島まり 他100名(2020):氷を冷やしたとき、新しい理科4、東京書籍、p. 167.
- 大宮峻、笠井香代子(2022):光造形3D プリンタによる空間充填型結晶構造モデル教材の開発、宮城教育大学情報活用能力育成機構研究紀要、2、p. 39-45.
- 佐々木碧斗、笠井香代子(2022):GIGA スクール構想を志向した3D デジタルコンテンツの開発と実践—物質構造ライブラリにおける3D 構造データの WebAR 化の試み—、日本科学教育学会研究会研究報告、37(2)、p. 37-40.
- 下村博志(2023):3D プリンターで製作する簡易比色計と市販飲料を活用する茶飲料中カテキン類の分析実験、上越教育大学研究紀要、43、p. 492-495.
- 山口勇二(2021):初めての3D プリンタ選択ガイド、Interface、47(10)、p. 33-36.
- 柳生浄勲、結石友宏、河島巖(2017):トコトンやさしい 3D ものづくりの本、日刊工業新聞社。

(令和6年2月22日受理)

Development and Practical Research of 3D Digital Teaching Materials in Chemical Education

* KASAI Kayoko, ** TAMBATA Sayaka, *** WAKO Aki,
**** SASAKI Aoto and **** NAKAKUBO Moeri

Abstract:

As the introduction of "one terminal per student" and 3D printers in schools is being promoted, there is a need for knowledge on how to utilize these devices and teaching materials. In this study, laboratory apparatuses were designed using 3D CAD software and fabricated with PLA filament using a fused deposition modeling (FDM) 3D printer, with the aim of creating comprehensive teaching materials that can be widely used in school education classes through 3D printing. The apparatuses were confirmed to be chemically resistant to 1.5 mol/L HCl, 1.5 mol/L NaOH, and ethanol, which are used in junior high school science classes. In addition, test tube holders for use in elementary school science classes were fabricated and used in a university class. A questionnaire survey of the students suggested the usefulness of this material. Next, 3D digital data of molecules and crystal structures that can be fabricated by 3D printing and viewed by ICT terminals were created as teaching materials. Molecule structure models of each isomer of menthol and sucrose fabricated inexpensively using a stereolithography (SLA) 3D printer. Web3D/AR teaching materials were developed from 3D data of molecular structures of limonene isomers and used in a university class. A questionnaire survey of the students suggested that the teaching materials promote understanding of the stereostructures.

Key Words : 3D Digital Teaching Materials, 3D Printer, Chemical Education, Molecular Model, Web3D/AR

* Faculty of Education, Miyagi University of Education
** Graduate School of Education, Miyagi University of Education
*** Sendai Oonoda Elementary School
**** Iwanuma Elementary School
***** Miyagi Prefecture Miyagino Senior High School

