

3D プリンターで製作した分子模型を用いた立体化学教育の実践

A Practice of Teaching Stereochemistry Using a 3D Printed Molecular Models

菰 田 剣

Ken KOMODA
前原市立前原東中学校

宮 地 作 造

Sakuzo MIYACHI
福岡市立田隈小学校

伊 藤 克 治

Katsuji ITO
福岡教育大学理科教育
研究ユニット

(令和5年9月29日受付, 令和5年12月22日受理)

抄 録

有機化合物の性質とその反応を理解するためには、三次元構造を理解することが重要である。しかし、構造式は二次元で抽象的な情報であることから、その分子の三次元構造を理解することは容易ではない。筆者らはこれまでに、3D プリンターを用いたモノクロやフルカラーの分子模型の製作とその加工精度について報告している。そこで今回、製作した分子模型を用いて、大学生を対象とした立体化学に関する学習を行って教育効果を検証したので、その詳細を報告する。

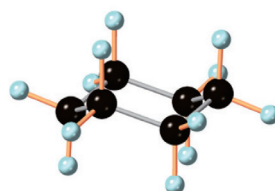
1. はじめに

有機分子の性質とその反応を理解するためには、三次元的な分子構造を頭の中でイメージする力が必要である。このため、教員養成大学である本学では、分子模型を用いて有機分子の三次元構造を捉える力だけでなく、高等学校における分子模型を用いた指導法についても、学生に身に付けさせる必要がある。そこで、本学の専門科目（有機化学Ⅱ）においては、分子模型を実際に自分の手で組み立て、構造式から三次元構造をイメージできる力を身に付けるような授業を行っている。

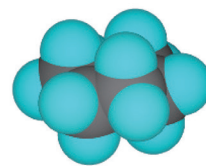
シクロヘキサンをモデルとした分子模型の例を図1に示す。各原子を球で、結合を棒で表現した球棒モデル、原子の大きさや結合長などが実際の形に即している空間充填モデル、原子間の結合のみを表したワイヤーモデルの3種類が代表的である¹⁻³⁾。

学校教育現場での分子モデルの扱いについては、まず中学校第1分野「(4) 化学変化と原子・分子 (ア) ④ 原子・分子」で、「分子については、幾つかの原子が結び付いて一つのまとまりになったものであることを扱う」とある⁴⁾。教科書ではこれまで学習してきた粒子モデルとの親和性が高

いことから、空間充填モデルが掲載されていることが多い。この学習を踏まえて、高等学校の「化学基礎」では、共有結合を学習する際には、多くの教科書で原子間の結合が分かりやすい球棒モデルを使って説明されている。その後、「化学」の「(4) 有機化合物の性質 (ア) ⑦炭化水素」においては、脂肪族炭化水素について、アルカン、アルケン、アルキンの代表的な化合物の構造や性質、



球棒モデル



空間充填モデル



ワイヤーモデル

図1 シクロヘキサンの分子モデル

反応を扱うことになる。その学習では、「分子模型を用いて炭素骨格の形には鎖状のものと環状のものがあることを扱う」と示されている⁵⁾。このため、大学入学後の有機化学の初学者は、球棒モデルが最も馴染みがあるモデルであるといえる。実際、本実践に先立って令和4年度に実施した分子模型を使った立体化学の学習における事前アンケートでは、3つのモデルについての分かりやすさを尋ねたところ、「分かりやすい」と「まあまあ分かりやすい」の合計である肯定的な回答は、空間充填モデル：40.9%，球棒モデル：86.3%，ワイヤーモデル：72.7%であり、空間充填モデルが一番低い値であった⁶⁾。

しかし、上記のように空間充填モデルは中学校の教科書でも掲載されているモデルであり、その形を理解しておくことは重要である。また、原子間の結合が分かりにくいからこそ、実際の構造式と見比べながらよく観察することで、立体化学（三次元的構造）の理解が定着するのではないかと考えた。そこで本実践では、鏡像異性体の絶対配置の学習において、空間充填モデルと球棒モデルの分子模型を用いた実践を行ったので、その詳細について報告する。

2. 実践内容

本実践は、本学の中等教育教員養成課程理科（化学）専攻3年生向けに開講している「有機化学Ⅱ」の2回の授業（各90分）で受講生15名を対象に以下の流れで行った。

【1 時間目】

この時間に学習するモデル化合物として、図2上段左に構造式を示している酢酸スチラリルを選んだ。

- (1) まず、図2上段右に示す白色の酢酸スチラリルの空間充填モデルの *R* 体8個と *S* 体7個を用意し、化合物名と絶対配置は伝えずに、1人に1つずつ *R* 体か *S* 体の一方を配布した。この際、ヒントとして分子式 ($C_{10}H_{12}O_2$) を受講生に伝えた。
- (2) この分子模型とヒントの分子式をもとに、各自で構造式と絶対配置について考察させ、学習プリントに記述させた。
- (3) 2名のグループを作らせ、お互いの分子模型を交換して、各自が考えた構造式と絶対配置が正しいか、交流させた。
- (4) 図2下段左と右に示すカラーの分子模型（空間充填モデルおよび球棒モデル）を配布し

て、再度絶対配置が正しいかを考えさせた。

- (5) 市販の球棒モデルとワイヤーモデルを用いて、酢酸スチラリルの分子模型をそれぞれ作成させ、*R* 体と *S* 体の分子の絶対配置を確認させた。

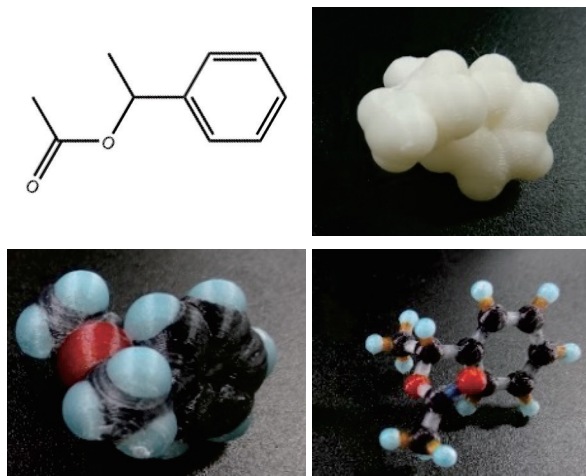


図2 上段左：酢酸スチラリルの構造式，上段右：白色の空間充填モデル，下段左：カラーの空間充填モデル，下段右：カラーの球棒モデル

【2 時間目】

確認テスト用として、鏡像異性体をもつ分子の白色の空間充填モデルの15種類を用意した。表1には、そのうちの4種類を例として示している。

- (1) 分子式を添えて、白色の空間充填モデルの分子模型を1人に1つずつ配布し、その構造式と絶対配置を考察させた。考える際には、必要であれば球棒モデルやワイヤーモデルの好きな分子模型を使用して良いこととした。
- (2) 個人の検討が終わったところで、隣の学生と分子模型と学習プリントを交換して考えさせた後、構造式と絶対配置が正しいか、お互いの考えを交流させた。交流後に自分の当初の考えが間違っていた場合は、学習プリントの記載を訂正させた。

表1 確認テストに用いた分子の例

1	2	3	4
$C_5H_{10}O_3$	$C_5H_{11}NO_2$	$C_5H_{10}O_3$	$C_4H_9NO_3$
S	S	S	S

3. 実践結果

1 時間目の授業で、酢酸スチラルルの白色の空間充填モデルを見ながら各自とグループで考えている間は、白色で原子ごとに色がついていないこともあり、立体的な構造を捉えるのに苦労している様子が見られた (図 3)。

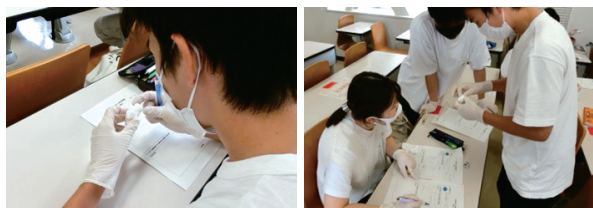


図 3 白色の空間充填モデルを観察している様子

その後の原子ごとに色分けされているカラーの分子模型を見ながら考える段階では、構造式と絶対配置の理解が進み、市販の分子模型を使って作成したものと比較しながら、構造式と絶対配置を確認できていた。学習プリントの記述からも、最終的に構造式・絶対配置ともに正答している学生が大多数となった (図 4, 5)。



図 4 カラーの空間充填モデルを観察している様子

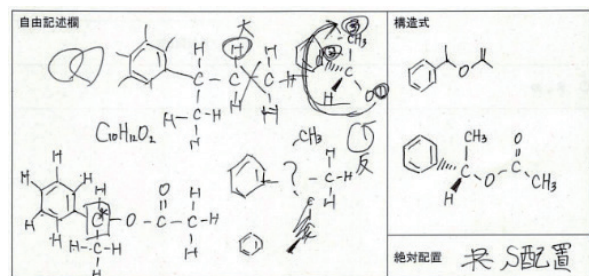


図 5 学習プリントの記述内容

2 時間目に行った白色の空間充填モデルを見て構造式と絶対配置を決めるテストでは、前時に白色の空間充填モデルに慣れたこともあり、各自の考察は比較的スムーズに進み、さらに、グループでの協議を通して、全員が正しい構造式を描くことができていた (図 6)。



図 6 白色の空間充填モデルを観察している様子

今回の授業を通して、「構造式から具体的な分子の形をイメージできるようになったか」を 4 件法で尋ねたアンケート結果を図 7 に示す。実践前は、「よくできる」と「まあまあできる」を合わせた肯定的な回答が 5 人 (33.3%) であったが、実践後は全員が肯定的回答であった。この結果が統計的に有意であるかを調べるため、Wilcoxon の符号順位検定を行ったところ、有意水準 $p < 0.05$ であり、統計的にも有意に上昇していることが明らかになった。

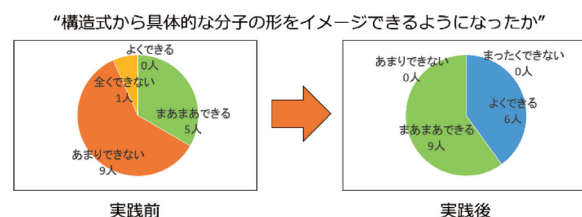


図 7 分子のイメージ力に関するアンケート結果 (N=15)

また、アンケートでは自由記述として、「3D プリンターで製作した分子模型についての感想」、「立体化学を将来高校生に教えることについて」、「授業を受講して感じたことや何か変わったこと」の 3 つの視点で記述してもらった。これをテキストマイニングによる分析を行った。分析における形態素解析は KH-Corder ver.3. Alpha. 17a⁷⁾ による ChaSen を用いた。

まず、どのような語と共に出現するかという関係性の分析を行って得られた共起ネットワーク図を図 8 に示す。共起ネットワーク図では、丸が使われている単語の出現頻度であり、丸が大きいと出現頻度が高いことを表している。また、丸同士が線でつながっていると共起関係が大きいことを表している。

実践前の図では、“モデル”という語句は、“理解”という語句との共起関係が大きいことが分かる。一方、実践後には“モデル”という語句は共起ネットワーク図には現れず、代わりに“空間充填モデル”や“球棒モデル”などの具体的なモデ

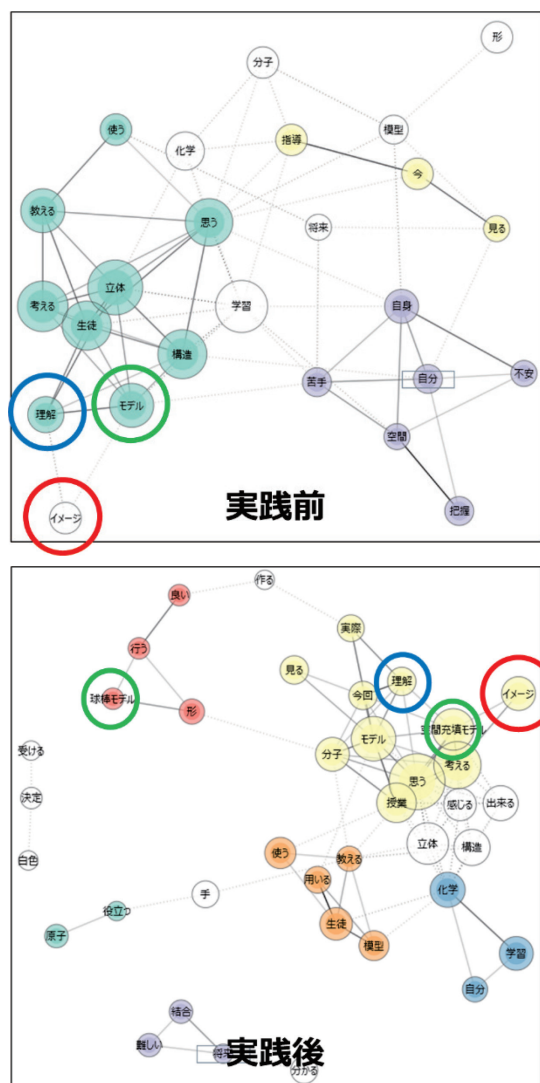


図8 自由記述の共起ネットワーク図
(KH-Corder による分析)

ル名が現れており、実際に授業で使用した分子模型の印象が強くなっていることが分かる。

本実践では、構造式から三次元的な分子構造をイメージする力を養うことを目的としたことから、この共起ネットワーク図中の語句のうち、「イメージ」という語句について、具体的にどのように記述されているのかを調べた。

はじめに、学生個人に注目して、学習前後での記述の変容について分析を行った。実践前後ともに、自由記述において「イメージ」という語句を使用した学生の記述の変化は以下の通りであった。

- ・「“イメージ” がわきにくい」→「“イメージ” が深くなった」
- ・「“イメージ” しづらいと思う」→「現実的な形

を“イメージ” することが出来た」

- ・「“イメージ” しづらい」→「“イメージ” できる能力の育成とともに、考える上での基本の知識も大切」

このように、否定的な文脈で使用されていたものが、肯定的な文脈へと変容したことが分かった。また、実践前のみ「イメージ」という語句を使用した学生について実践後の自由記述を見ると、以下のように肯定的な記述であることが分かった。

- ・空間把握能力が上がっていることを実感できた
- ・頭の中がすっきり整理できた

続いて、学習集団全体として「イメージ」という語句がどのように文章中で使われていたかを分析した(表2)。その結果、実践前に「イメージ」という語句を使った学生の全員が、「イメージ」がしづらい、「イメージ」がわきにくい、「イメージ」するのに時間がかかる、「イメージ」することが苦手など、イメージのあとにマイナスの表現をしていた。しかし、実践後では、「イメージ」が深くなった、「イメージ」形成に役立つ、「イメージ」することができた等、プラスの表現をしていた。また、その他の記述でも実践前のようなマイナス的な表現で使われている記述は見られなかった。

表2 イメージという語句の実践前後での使われ方

“イメージ”			
実践前		実践後	
+	記述無し	+	“イメージ” が深くなった “イメージ” 形成に役立つ “イメージ” することが出来た
-	“イメージ” がしづらい “イメージ” がわきにくい “イメージ” するのに時間がかかる “イメージ” することが苦手	-	記述無し

4. まとめと今後の展望

以上述べたように、3Dプリンターで製作した空間充填モデルと球棒モデル及び、市販の分子模型を用いた有機分子の立体化学の学習を通して、抽象的な構造式から分子の三次元構造をイメージさせることができた。このようなイメージ力が育っていると、その後の反応機構の学習において、構造式を使った反応スキームだけでも理解しやすくなるものと考えている。

今回の実践では、分子模型の中で最も分かりにくい空間充填モデルを敢えて用いたことで、学習者は手にとって何度も分子模型を見返しながら構造を理解し、立体構造が強く印象に残ったと考えている。現在、すぐには理解できないような三次元構造を捉えさせるためのデジタル教材が充実しているが、効率的・効果的に理解させるためのデジタル教材と、時間はかかるが手にとって理解させるためのアナログ教材との最適な組み合わせが実感を持った理解のために大切であると考えている。このような考え方を活かして、今後、動的な科学現象を理解するための教材開発につなげていきたい。

謝 辞

本研究の一部は、JSPS 科研費基盤研究 (C) (課題番号: 21K02903「科学現象の理解を深める STEAM 教材の開発と実践研究」, 研究代表者: 伊藤克治) 及び、JSPS 科研費基盤研究 (C) (課題番号: 22K02973「中等教育理科における「単元の指導計画」に着目した学習プログラム及び評価方法の研究」, 研究代表者: 野内頼一) の助成を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 池平秀行, 佐藤和久, 化学と教育, 第 49 巻, 第 10 号, pp.637-642 (2001).
- 2) 分子模型製作の報告例: (a) 藤瀬 裕, 堀内健太郎, 化学と教育, 第 38 巻, 第 2 号, pp.216-219 (1990); (b) 武田正彦, 化学と教育, 第 43 巻, 第 10 号, pp.666-666 (1995); (c) 松川 覚, 荒井香澄, 茨城大学教育学部紀要 (自然) 第 57 号, pp.27-38 (2008); (d) 田中幸枝, 浅原雅浩, 川井昌之, 小鍛冶 優, 上田昌範, 藤井 豊, 福井大学医学部研究雑誌, 第 11 巻, 第 1 号・第 2 号, pp.1-6 (2010).
- 3) 3D プリンターを用いた有機分子の製作に関する報告: (a) 伊藤克治, 大内 毅, 長澤五十六, 福岡教育大学紀要, 第 67 号, 第 6 分冊, pp.1-4 (2018); (b) 伊藤克治, 大内毅, 福岡教育大学紀要, 第 68 号, 第 6 分冊, pp.1-5 (2019); (c) 菰田 剣, 大内 毅, 伊藤克治, “フルカラー 3D プリンターによる分子模型の製作” 第 71 回理科教育 学会全国大会発表論文集 第 19 号, p.246 (2021); (d) 伊藤克治, 宮地作造, 菰田 剣, 西辻真央, 福岡教育大学紀要, 第 71 号, 第 3 分冊, pp.13-18 (2022).
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 伊藤克治, 福岡教育大学紀要, 第 72 号, 第 6 分冊, pp.13-18 (2023).
- 7) 樋口耕一『社会調査のための計量テキスト分析 ―内容分析の継承と発展を目指して― 第 2 版』ナカニシヤ出版, (2020).

