

ワイヤーフレーム型分子模型を用いた有機化学の対面 / 遠隔学習 (2)

In-Person/Remote Learning of Organic Chemistry Using a Wire-Frame Type Molecular Model (2)

伊藤 克治

Katsuji ITO

福岡教育大学理科教育研究ユニット

(令和4年9月29日受付, 令和4年12月20日受理)

要 約

筆者は昨年度に, モールとストローから安価で容易に作成できるワイヤーフレーム型の分子模型を用いた授業実践について報告した。今回, 市販のプラスチック製のワイヤーフレーム型の分子模型を他のタイプの模型と共に対面授業で用いて, 分子の立体構造を理解させる実践を行った。この中で, 球棒モデル, 空間充填モデル, ワイヤーモデルの3つの分子モデルについて, 実践前後の理解度の変容を調べた。また, 自作のワイヤーフレーム型の分子模型は, 授業時間外の学習に位置付けた遠隔学習として行ったので, これらの実践内容について報告する。

1. はじめに

有機化合物の性質を理解するためには, その三次元構造を捉える必要がある。平成30年告示の高等学校学習指導要領解説 理科編の「化学」では, 「(4) 有機化合物の性質 (ア) ⑦炭化水素」で脂肪族炭化水素の性質や反応を, その構造と関連付けて理解させることがねらいとされており, 「分子模型を用いて炭素骨格の形には鎖状のものや環状のものがあることを扱う」と示されている¹⁾。さらには, 「炭素原子の電子配置の資料を示して, メタンが正四面体形である理由について, 電子配置と構造とを関連づけて触れることも考えられる。」とあり, 単に三次元構造を捉えるだけでなく, なぜそのような形になるのかを生徒に考えさせることが求められている。

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, 高等学校における指導力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, 分子模型を実際に自分の手で組み立てて, 構造式から三次元構造をイメージできる力を身に付けさせる授業を行っている。

中等教育で用いられる分子模型は, 主に球棒モデルと空間充填モデルであるが, 高等教育におけ

る授業では, 構造式を用いて反応機構を学習する内容が多いことから, より構造式に近いワイヤーフレーム型モデル(以後, ワイヤーモデル)も用いている。図1には, 授業で扱っているシクロヘキササン(C_6H_{12})を例に, 各モデル^{2,3)}を示している。

令和2年度の本学の授業では, コロナ禍で遠隔授業になったことから, 自宅でも容易に製作できる分子模型として, モールとストローで作成するワイヤーモデルの分子模型を授業教材として初めて扱った。また, 令和3年度は対面授業でも製作させて, それらの実践内容について, 本紀要で報告した^{4,5)}。

実践後のアンケート結果では, 学習に相応しい分子模型については, 球棒モデルが63%, ワイヤーモデルが37%であった。その理由については, 球棒モデルが良いと回答した学生のほとんどは, 「頑丈」, 「安定している」, 「結合角を忠実に再現」などの理由であった。自作のワイヤーモデルはモールを使っていることから柔軟性が高いため, 製作に苦勞する学生が多かったことがこのような回答につながったとも考えられる。このため, ワイヤーモデルの有効性については, ワイヤーモデルの形と理解との関係性よりも, 作りやすさの視点で評価された可能性が高い。また, 空

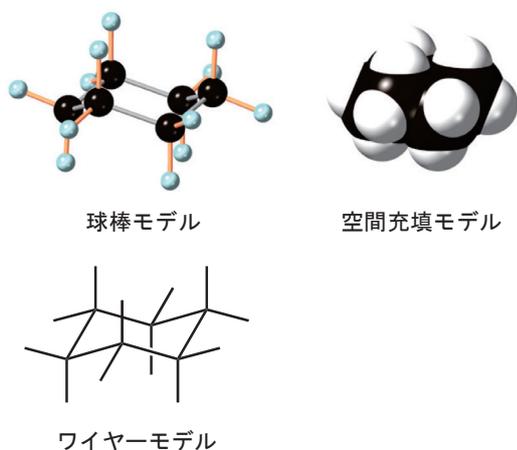


図1 シクロヘキサンの分子モデル

間充填モデルについては、実際に作成していないことから理解が進まなかったといえる。

そこで令和4年度の授業では、市販のプラスチック製のワイヤーモデル型模型を他のタイプの模型と共に対面授業で用いて、分子の立体構造を理解させる実践を行い、それぞれの分子模型から立体構造をどれくらいイメージできたかを確認した。また、モールとストローで製作する自作ワイヤーモデル型模型については、授業時間外の学習時間の中で、課題として製作させた。これらの実践内容について報告する。

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)で以下の流れで行った。

1回目: 脱離反応であるE2反応とE1反応の概要を説明後、シクロヘキサンの椅子型の構造とその描き方を説明し、市販の分子模型(ワイヤーモデル、球棒モデル、半空間充填モデル)でシクロヘキサンを作らせた。これを用いて、シクロヘキサン骨格をニューマン投影式で描かせた。授業後にモールとストローを配布し、これらを使って作成したシクロヘキサンのワイヤーモデル型模型の画像の提出を課題とした。

2回目: まず、ワイヤーモデル型の分子模型を使って、E2反応の立体電子的効果を考えさせた。最後に、シス-デカリンとトランス-デカリンの構造式を板書し、それぞれ分子模型について、自分が見やすいタイプの分子模型を使って作らせた。

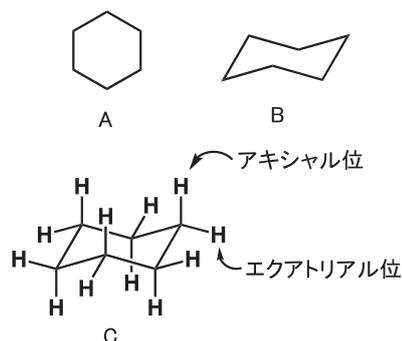


図2 シクロヘキサンの構造式

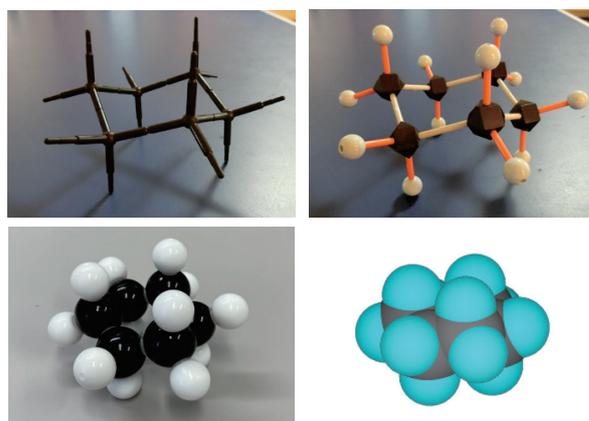


図3 市販の分子模型(左上:ワイヤーモデル, 右上:球棒モデル, 左下:半空間充填モデル)及び、空間充填モデル図(右下)

3. 実践結果

3.1. シクロヘキサンの分子模型の作成

シクロヘキサンの構造式は、図2のAのように表されるが、各頂点の炭素原子は正四面体型であるため、見やすく斜めから書くと、Bのような椅子型で表される。なお、通常の構造式ではC-H結合を省略するが、実際の構造では、各頂点の炭素原子にアキシャル位とエクアトリアル位を占める水素原子が結合しており、これを詳しく書くとCのような構造式で表される。分子模型を作成するには、アキシャル位とエクアトリアル位を正しく示す必要がある。

今回使用した市販の分子模型三種でシクロヘキサンを作成したものを図3に示す。空間充填モデルは右下の構造であるが、これを忠実に再現した分子模型(CPKモデル)は、現在、通常の市販がされていない。そこで、球棒モデルの棒を極端に短くして空間充填モデルに近い形を表現する半空間充填モデル(左下)を用いることにした。

授業時に学生が作成している様子を図4に示す。アキシャル位とエクアトリアル位に位置する



図4 シクロヘキサンの分子模型作成の様子

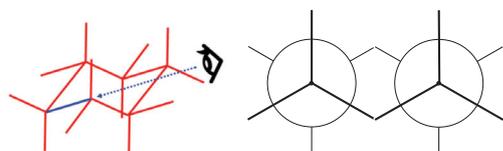


図5 シクロヘキサンのニューマン投影図

水素原子を整えるのに戸惑っている様子が見られたが、周りの学生と相談して確かめながら、目的の三種類の分子模型を作成することができた。

得られた分子模型を用いて、炭素-炭素結合軸に沿って眺めて (図5左)、実際に見える形をスケッチさせ、ニューマン投影図が図5右のように書き表されることを確認させた。

3.2. 自作ワイヤーモデル型分子模型の製作

授業終了時に、図6に示したようなモールとストローを2本ずつ配布し、筆者が考案したワイヤーモデル型分子模型の作成方法を説明した。昨年度の反省として、ストローにモールをはめ込んでもかなり緩かったことから、本年度は市販品で最も細いストロー (図6上: 直径3.5×長さ150 mm) にした。モールは、通常の手芸用の市販品 (図6下: 約300×6×6 mm) を用いた。これらをそれぞれ四等分して用いた。授業の課題として、自分で作成したシクロヘキサンの分子模型の画像をオンラインで提出させた。

オンラインで提出された画像ファイルの一部を図7に示す。作成手順を説明していたが、実際に作成させてみると、骨組みと接続部分の柔軟性が高いためか、苦労した様子が見られた (図7左)。10点満点で、六員環の椅子型の表現 (6点) とアキシャル位・エクアトリアル位の表現 (各2点) で採点したところ、21名の平均点は6.6点であった。図7右の分子模型は全ての条件を満たしているので10点である。



図6 ワイヤーモデル型分子模型作成用のモールとストロー

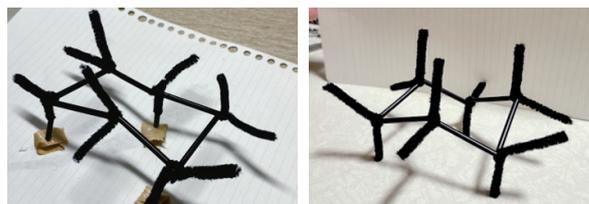


図7 提出された分子模型の画像

3.3. シス-デカリンとトランス-デカリンの構造式と分子模型

次の授業では、ビシクロアルカンの一種であるデカリンのシス体 (図8左) とトランス体 (図8右) について、平面構造式から六員環の椅子型をノートに描かせた。その際には、自分の見やすいタイプの分子模型を使ってそれぞれのデカリンを作らせ、構造式と見比べて三次元構造を確認させた (図9)。

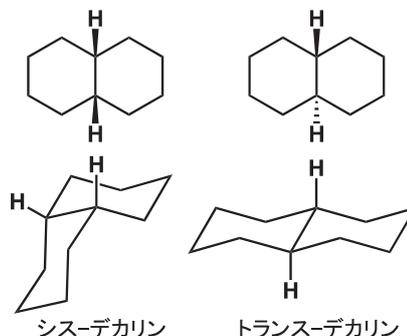


図8 シス-デカリンとトランス-デカリンの構造

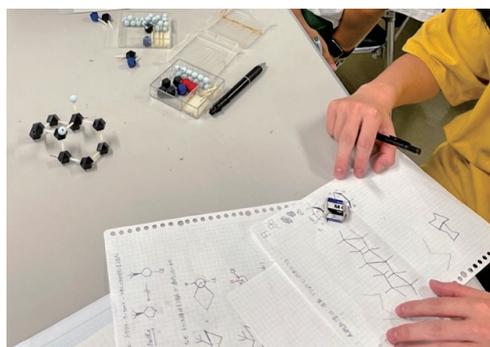


図9 シス-及びトランス-デカリンの分子模型作成の様子 (写真左上のモデルは球棒モデル)

4. アンケート結果と考察

本年度の実践では、授業の前後比較をするために事前アンケートと事後アンケートを行った(図10)。「分子模型があると分子の三次元構造を理解しやすい」と「分子模型を使った学習は意義がある」の2つの問いについては、事前と事後アンケートで「そう思う」と「ややそう思う」を合計した肯定的回答が100%であり、その割合についても、前後でほとんど変化がなかった。昨年度は事後アンケートのみであったため、実践前の実態を把握できていなかったが、今回のアンケート結果から、実践前から全ての学生が分子模型を使用する価値を感じていることが分かった。

今回の実践の目的は、様々な分子模型を使った学習を通して、抽象的な情報である構造式から具体的な三次元の分子の形をイメージできるようにさせることである。そこで、「構造式から具体的な分子の形をイメージできる」の質問を今年度初めて行った。その結果、実践前は肯定的回答が50.0%であったが、実践後は72.7%に上昇した。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、 $p < 0.05$ 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。

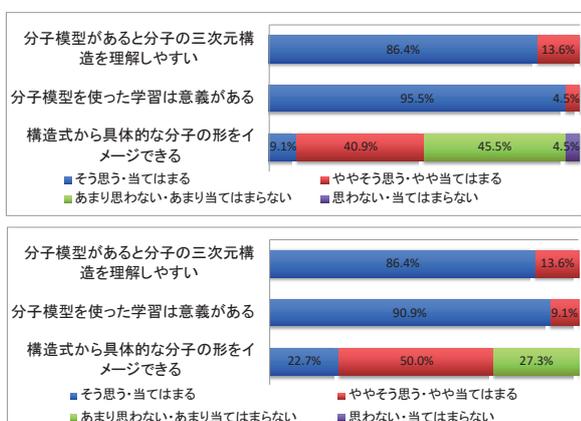


図10 分子模型を使った学習のアンケート結果 (n=21, 上: 事前, 下: 事後)

また、「今回のようにシクロヘキサン骨格を理解するためにはどのようなモデルが相応しいか」を実践前後で尋ねた結果を図11に示す。実践後はワイヤーモデルの回答が若干増えたが、実践前後ともに球棒モデルの回答が最も多かった。これは、中学校・高等学校の教科書の図として用いられていることから、馴染みのあるモデルであることが大きな理由であると考えたが、学生の回答(自由記述)では、「原子の位置、種類、数、つな

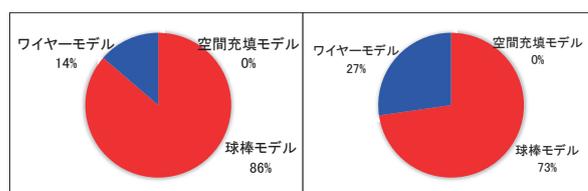


図11 分子模型を使った学習のアンケート結果 (n=21, 左: 事前, 右: 事後)

がり分かりやすい」という理由であった。空間充填モデルは、教科書会社によっては中学校や高等学校でも用いられているものの、原子間の繋がりを理解するのは見慣れている学習者でも容易とはいえない。今回の結果に照らしても、分子骨格の理解には難しいモデルであると考えられる。

一方、高等教育で登場するワイヤーモデルは、原子の「球」を表現せず、モデルの各頂点に原子があることが暗黙の了解になっている。このことに慣れれば問題はないが、専門教育の経験が未だ十分ではない学生たちにとっては、高等学校までに目にしていたモデルに馴染みがあるといえる。実際、実践前はワイヤーモデルが相応しいと回答したものの、実践後に球棒モデルが相応しいと回答した学生が1名いたが、その理由として「ワイヤーモデルは骨格のみを描く線形構造式を考えて作られているが、線形構造式に慣れていないと、球棒モデルの方が高校までの構造式を考えて作られているために理解しやすいから」と回答していた。

ワイヤーモデルが良いと回答した理由としては、「すっきりしていて構造を観察しやすい」、「結合角をより意識しやすくなることに加え、最小限の情報で表せるため、見やすい」、「作成に慣れれば、観察してそのままノートに書くことができる」のように、紙面に描く構造式に近いことが挙げられていた。

次に、実践前後で各モデルの分かりやすさを質問した結果を図12に示す。事後アンケートでは、球棒モデルとワイヤーモデルについて、「分かりやすい」と「まあまあ分かりやすい」の回答の合計は、いずれも100%であった。統計的有意差を確かめるためにWilcoxonの符号順位検定を行ったところ、ワイヤーモデルのみが有意に上昇していることが明らかになった($p < 0.01$)。したがって、図11のように学生にとって学習に最も良いモデルは球棒モデルが多いものの、ワイヤーモデルを使った分子構造の理解は進んだことが分かる。



図 12 各分子模型の分かりやすさ
(n=21, 上: 事前, 下: 事後)

なお、これらの中で最も分かりにくい空間充填モデルでも、統計的な有意差はないものの、分かりやすさの肯定的な回答が増えていることが分かる。球棒モデルでは、実践前でも分かりやすさの肯定的な回答が86.3%であったが、実践後は100%になった。これらのことから、分子模型の使用は、分子の立体構造を学習する上で有効であることが確かめられた。

また、今年度は授業時間外に取り組んでもらったモールとストローを使ったシクロヘキサンのワイヤーモデル型分子模型の作成について、感想を書いてもらった。予想通り、「苦勞した」、「大変だった」の記述が多かったが、「自分で意識しながら作ることで、紙面に書いた物質を頭の中で想像しやすくなってよかった」、「自分で考えながら作成するため、どことどこが平行になるのかを繰り返し学習でき、立体構造が頭に入りやす」と感じたなど、苦勞したからこそ理解が深まったとの感想が多かった。昨年度も、ワイヤーモデルの良さについて、「モデルを作るのに少し苦戰するため、より定着しやすい」との感想があり、試行錯誤の経験によって理解が進み、定着する良さがあるといえる。

また、身近で安価な材料（モールとストロー）を使って作ることができるため、高等学校の教材として活用できるとの感想もあった。

6. まとめと今後の展望

以上述べたように、今回、三種類の分子模型（空間充填モデル、球棒モデル、ワイヤーモデル）を使って分子の立体化学を学ぶことで、構造式か

ら具体的な分子の形をイメージする力が育成されることが確かめられた。特に、多少苦勞するワイヤー型の分子模型作成を授業後の課題にしたことで、授業で学んだことがさらに深まったといえる。直接手にできる教材を使って試行錯誤する経験が学習をさらに深める効果があることは、今後とも大切にすべき点である。

一方、現在は教育DX（デジタル・トランスフォーメーション）が注目されており、次々に新しいデジタル教材も開発されている。巧みに作られたデジタル教材は理解しやすいという良さがあるが、そのことで学習者は分かってしまったつもりになって、定着しないという危険性もある。多少苦勞は伴うが、試行錯誤を繰り返す中で定着を図ることができる教材の良さもある。それだけに、手にはできないが、直感的な理解を促すデジタル教材の良さと、手にすることができる教材の良さについて、ベストな組み合わせを追求することが大切であると考えている。このような考えを、今後の教材開発と実践に取り入れていきたい。

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) 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.
- 2) 池平秀行, 佐藤和久, 化学と教育, 第49巻, 第10号, pp.637-642 (2001).
- 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) 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) 伊藤克治, 福岡教育大学紀要, 第71号, 第6分冊, pp.1-5 (2022).
- 5) 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卷, 第2号, pp.216-219 (1990); (b) 武田正彦, 化学と教育, 第43卷, 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卷, 第1号・第2号, pp.1-6 (2010).