

ワイヤースケルトン型分子模型を用いた有機化学の対面／遠隔学習

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

伊 藤 克 治

Katsuji ITO

福岡教育大学理科教育ユニット

(令和3年9月29日受付, 令和3年12月23日受理)

抄 録

有機化合物の三次元構造の学習では, 学習者が直接手にして構造を確かめることのできる分子模型が有効な教材である。しかし, 令和2年度の本学の有機化学の授業は遠隔授業になったため, 教員保有の貸し出し用の分子模型を使うことができなくなった。そこで, 学習者が自宅でも容易に作成できる安価な分子模型として, モールとストローで作成するワイヤースケルトン型の分子模型を新たに考案し, 実際の授業で用いた。また, 令和3年度は対面授業で同様の内容を行ったので, これらの実践内容について報告する。

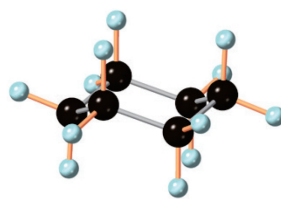
1. はじめに

有機化合物は炭素原子を含む一連の化合物で, これを構成する元素は炭素, 水素, 酸素, 窒素が主である。構成元素の数は少ないものの, 炭素原子を中心に様々な原子と安定した共有結合を作ることができるため, 無機化合物と比べるとかなり多くの化合物がある。さらに, 有機合成化学の進歩により, 日々, 新たな有機化合物が人工的に合成されている。

ある有機化合物の性質, あるいは, その有機化合物が他の有機化合物と相互作用するメカニズムを解明するためには, それらの三次元構造を理解することが重要になる。近年のコンピュータによる計算化学の進歩により, 分子構造の解析や分子間相互作用のシミュレーションが容易になった。しかしながら, 三次元構造を直感的に理解するためには, 実際に手にすることができる分子模型が時代を問わず重要なツールである。このため, 本学の有機化学系の授業では, 有機化合物の分子模型を使った学習を行っている。しかし, 令和2年度の本学の有機化学の授業は遠隔授業になったため, 教員保有の貸し出し用の分子模型を使うことができなくなった。そこで, 学習者が自宅でも容易に作成できる安価な分子模型を新たに考案することにした。

2. 分子模型の種類

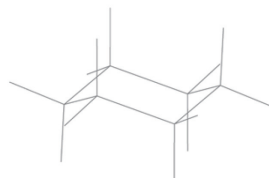
中等教育・高等教育で用いられる分子模型は, 球棒モデル, 空間充填モデル, ワイヤースケルトンモデルの3種に大別できる¹⁾。シクロヘキサン (C_6H_{12}) を例に, 分子模型の種類と特徴について説明する(図1)。



球棒モデル



空間充填モデル



ワイヤースケルトンモデル

図1 シクロヘキサンの分子模型

球棒モデルは, 原子核の位置にある「球」を結合の「棒」でつないだものであり, 最も一般的な分子模型といえる。球の大きさには物理的な意味はないが, 棒の角度は結合角を正確に反映してい

る。また、棒の長さは結合長を反映しており、“大まかな”分子の大きさが分かる。現在、ネット上の通信販売で様々なキットが市販されており、簡単なキットは2,000円前後で入手することができる。

空間充填モデルはファンデルワールス半径が表されているので、分子の大きさと形が正確に反映されている。したがって、“粒子モデル”に最も近いモデルともいえる。しかし、原子間のつながりが見えにくいため、高等学校の教科書では球棒モデルと併記されていることが多い。アメリカの化学者の Corey, Pauling, Koltun の3名によって開発された空間充填モデルはCPKモデルと呼ばれており、研究レベルではよく用いられるが、市販品は比較的高価であることが難点である。

ワイヤーモデルは、結合角と結合距離は分かりやすいが、各原子や分子全体の大きさが分からないのが難点である。3種のモデルの中では最も抽象的な形であるが、構造式に最も近い形をしているため、構造式を使い慣れている研究者が比較的大きな分子を組み立てる際にはよく用いられる。空間充填モデル同様、球棒モデルに比べると市販品の種類は少なく、比較的高価である。

3. 中等教育と高等教育における分子模型の取り扱いについて

平成29年告示の中学校学習指導要領解説 理科編では、第1分野「(4) 化学変化と原子・分子 (ア) 物質の成り立ち ①原子・分子」において、物質は原子や分子からできていることを理解させることが主なねらいにされている。ただし、原子や分子はモデル（いわゆる粒子モデル）で扱うため、正確な構造ではない。しかし、教科書では例えば水分子は折線形、二酸化炭素は直線形の空間充填モデルで示されていることが多く、結合角は学習しないものの、高等学校「化学基礎」への接続が意識されているといえる。

平成30年告示の高等学校学習指導要領解説 理科編 理数編では、「化学基礎」の「(2) 物質の構成 (イ) 物質と化学結合 ④分子と共有結合」で、「分子からなる物質については、分子式や構造式で表すことができることを扱う」と示されている。各社の教科書では、メタンのような有機化合物をはじめ、アンモニア、水、二酸化炭素、窒素などの分子の形が取り上げられている。ここでは、結合長（結合距離）と結合角を学習するため、ここで初めて分子の正確な形を学習することになる。このため、教科書には球棒モデルや空間充填モデルとともに、分子の形が説明されている。さらに、

「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構造と関連づけて理解することとされており、「分子模型を用いて炭素骨格の形には鎖状のものと環状のものがあることを扱う」と示されている。これを受けて、教科書では炭素骨格、つまり炭素原子間の結合が分かりやすい球棒モデルが掲載されていると考えられる。

このような学習の系統性を踏まえて、高等教育の有機化学では、学習内容に応じて球棒モデル、空間充填モデル、ワイヤーモデルが使い分けられる。

4. 自宅で作成できる分子模型の開発

本学の中等理科3年生向けの「有機化学II」の授業では、E2反応（二分子脱離反応）の反応機構の学習に先立って、シクロヘキサン骨格の三次元構造の学習を行う。図2にはシクロヘキサンの構造式をいくつか示している。高等学校では、分子を構成する元素記号と結合を示す価標を全て描くのが基本で、Aのように表される。高等教育や専門の研究分野では、簡略化した構造式で描くのが普通であり、Bのように表される。この構造式を描く場合、各頂点の炭素原子と水素原子、C-H結合は省略するというルールになっている。ただし、高等学校でも、括弧内に示したように、ベンゼンだけは簡略化した構造式で描くことが普通になっている。AやBの構造式からは、六員環の正確な形が分からないため、立体化学の学習ではCのような椅子型で表記する。さらに、椅子型で描いた時の炭素原子上の置換基は、Dで示したように、真上あるいは真下方向がアキシアル位、斜め横方向がエクアトリアル位の2種類あることを学習する（図2では右上の炭素原子上のアキシアル位とエクアトリアル位のみ示しているが、6つの炭素

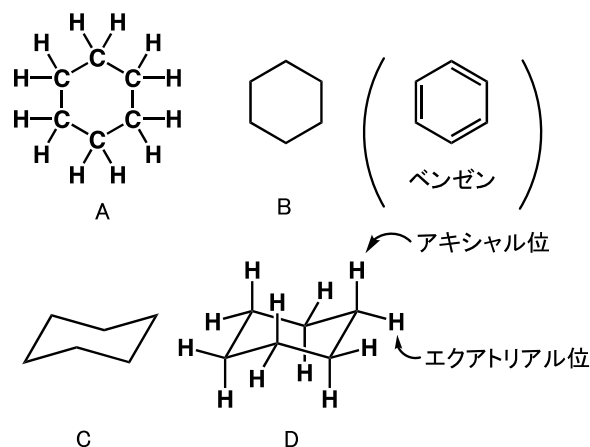


図2 シクロヘキサンの構造式

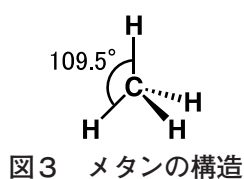
原子上全て、アキシアル位とエクアトリアル位がある)。

この学習において、従来の対面型の授業では演示あるいは個人用の球棒モデルの分子模型を使って三次元構造を捉えるようにしていた。しかし、令和2年度前期の本学の授業では、新型コロナウイルス感染拡大防止のため、開始当初は全て遠隔授業になった。本授業はオンデマンド型の遠隔授業で行うことにしたが、やはり、立体化学の学習では分子模型を使わせることで学生の理解を促したいと考えた。そこで、学生が自宅でも安価かつ容易に作成できる分子模型をオンデマンド型の遠隔授業で行うことにした。

今回の対象分子のシクロヘキサンは、アキシアル位とエクアトリアル位が空間充填モデルでは分かりにくい。球棒モデルは中等教育での教科書に記載されていることから、馴染みがあると思われるが、簡略化した構造式に最も近い構造であるワイヤーモデルを採用することにした。この分子模型を使った学習を通して、構造式から分子の三次元構造をイメージする力を身に付けさせることを目的とした。これまでに、自作分子模型については論文での報告例²⁾もあるが、論文にはない多くの実践も行われている。本実践では、安価で入手容易な材料から簡単に作成することができる、新しいワイヤーモデル型の分子模型を考案することにした。

4.1. シクロヘキサンのワイヤーモデルの作成方法

授業動画では、図3のメタンを6つ作り、それを輪になるように繋いでシクロヘキサンを作る説明をした。図4に動画で説明に用いた写真と、その作り方を示す。



- ① 100円ショップで手に入るモールを6本とストロー(なるべく細いもの)を用意する。



- ② モールをハサミで2つに切り、それぞれをV字型に折り曲げる。



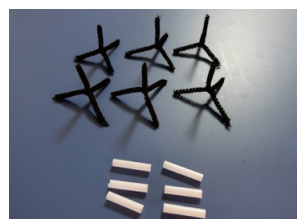
- ③ 折り曲げた部分を合わせて、根元で2回ほどねじって外れないように固定する。



- ④ 4本の足の先端を結んだ図形が正四面体になるように、足を曲げながら形を整える(メタンはH-C-Hの角度が全て109.5°)。



- ⑤ どのような置き方をしても、上から見た時にこのように見えれば、メタンの四面体構造を正しく作ることができている。



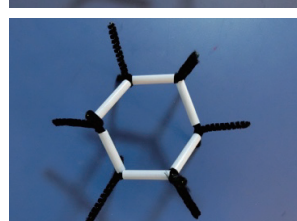
- ⑥ 同じようにして、メタンを6つ作る。また、足の長さに合わせてストローを切ったものを6つ用意する。



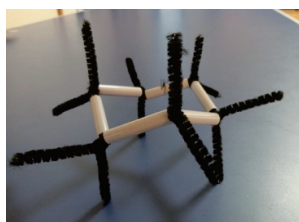
- ⑦ ストローにメタンの足を差し込み、2つずつ繋いだもの(エタン)を3つ作る。



- ⑧ ⑦で作ったうちの2つをストローを通して繋ぐ(これはブタンの分子模型になる)。



- ⑨ 残り1つのパーツを繋いで、上から見たときに六角形の輪にする。



- ⑩ アキシャル位とエクアトリアル位をきちんと向くように調整して完成。

図4 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の作成

図4の方法で作成したワイヤーモデルは、図5に示したような市販の分子模型で作成したものと比べても、同等のものができていることが分かる。

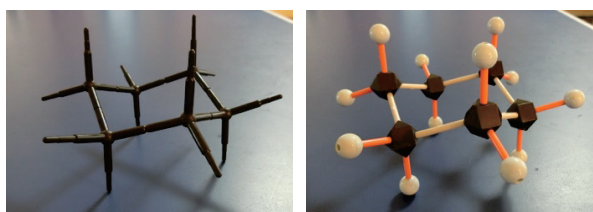


図5 市販の分子模型（左：ワイヤー型モデル，右：球棒モデル）

5. 実践結果と考察

上記の分子模型作成を、令和2年度は有機化学II(90分1コマ)の遠隔授業で行った。また、令和3年度は同様の授業を対面授業で行った。遠隔授業では、各自が作成した分子模型を撮影させ、課題として画像ファイルを提出させた。図6上段には、提出された画像ファイルの一部を示している。

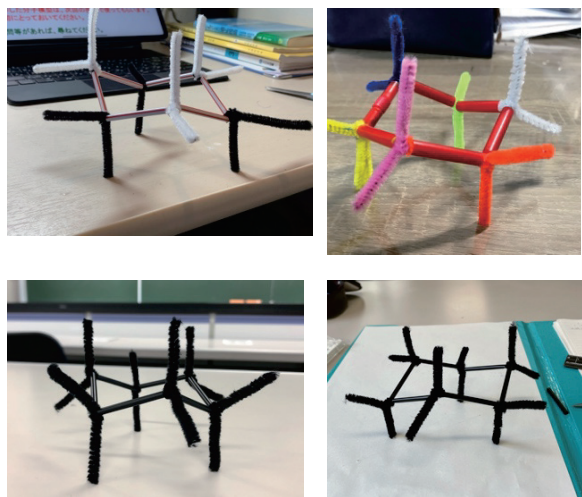


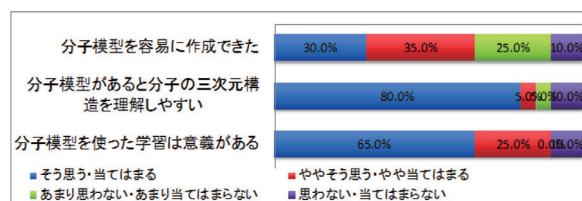
図6 提出された分子模型の画像（上段：遠隔授業，下段：対面授業）

ここにはうまくできているものを載せているが、アキシャル位とエクアトリアル位が正確な椅子型を作るのは苦労したようであった。令和3年度は対面授業で行ったので、作成段階で学生が苦労し

ている時には、適宜アドバイスをを行うようにした。

授業後に行ったアンケート結果を図7に示す。「分子模型を容易に作成できた」については、遠隔授業と対面授業の両方で、肯定的な回答が65%であった。モールは比較的曲がりやすく、また、ストローは細めのものを使っておかないと、手に持った時に分子模型がゆるくて変形しやすい。このため、アキシャル位とエクアトリアル位が正確な椅子型をうまく作ることに苦労したため、肯定的な回答が中程度であったといえる。

令和2年度（遠隔授業）(n=20)



令和3年度（対面授業）(n=17)

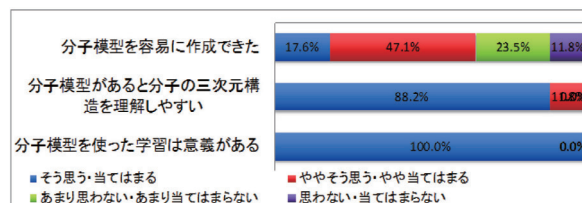


図7 ワイヤーモデルの分子模型を使った学習のアンケート結果

「分子模型があると分子の三次元構造を理解しやすい」については、遠隔授業で肯定的回答の割合が85%であった。このことから、自宅で作成できる分子模型を使った学習として一定の効果があったといえる。否定的な回答の要因としては、遠隔授業はオンデマンド型であり、授業後に課題として自作分子模型の画像ファイルを提出させたため、リアルタイムで分子模型の完成度について評価できなかったことが挙げられる。実際、令和3年度の対面授業では机間巡視しながら適宜アドバイスをしたので、ほぼ全ての学生が完成度の高い分子模型を作成することができた。令和3年度のアンケート結果では、肯定的な回答が100%であったことから、リアルタイムでフィードバックすることの有効性が見られる。したがって、今後、遠隔授業で完成度の評価をする場合は、同時双方向型で行うべきであろう。

この結果にも関係すると思われるが、「分子模型を使った学習は意義がある」の肯定的な回答は、遠隔授業では「そう思う」と「ややそう思う」を合わせて90%であったが、対面授業では「そう思

う」が100%であった。

今年度の実践について、「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」を尋ねたところ、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」などの理由であり、今回のワイヤーモデルでは柔軟性が高く、作成に苦労したことが窺える。なお、ワイヤーモデルが良いと回答した学生は、「自分でワイヤーモデルを作って形を整えた方が、印象には残りました」、「自分で作成することで構造を印象に残すことができた」、「モデルを作るのに少し苦戦するため、より定着しやすい」などの理由であり、苦労しながら自分の手で作ることで実感を伴った理解が進んだことが窺える。分子の三次元構造を捉えるためのデジタル教材もよく知られているため、この点は、デジタル教材との学習効果の比較という観点からも興味もたれる。

なお、自由記述欄では、17名中10名が対面授業の良さについて書いていた。その内容としては、「教授が私たちの作ったモデルを見て回る方が有意義な授業になると思いました」、「それぞれの進行度に応じて手助けをしてもらえる」、「先生が疑問を持っていそうな生徒に声をかけてくださる」、「対面だと先生にもっとこうした方が良いと教えていただきながら作ることができたので良かった」、「周りの友人と相談しながら作成できる」、「先生や友人に聞いたり、見せ合ったりすることでよりいいものが作れた」であった。なお、2名が対面授業の価値を認めつつも、「対面だと終わっていない人を待つ時間が長いと感じた」、「遠隔授業では授業の録画映像を見て何度もわからないところを復習できた」のように、各自のペースで学習することができるオンデマンド型遠隔授業の良さを述べている学生もいた。

6. まとめと今後の展望

以上述べたように、今回考案したワイヤー型分子模型は、有機分子の三次元構造を捉えるために有効な教材であることを確認できた。上記のように、高等学校「化学」では、脂肪族炭化水素の性質や反応を構造と関連づけて理解させるために、「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。それだけに、教員養成課程の高等教育では、分子模型を使った学習の意義について、実際に模型を扱わせながら実感させる必要がある。このため、今後は自作あるいは市販の球棒モデルや空間充填モデル³⁾も取り入れながら、学習内容に応じた分子模型の活用を考えていきたい。

また、「分子模型の作成」を通して、遠隔授業と対面授業の長所・短所を確認することができた。現在、新型コロナウイルスの完全終息の見通しが立っていない中で、大学⁴⁾と学校教育現場では遠隔授業と対面授業のベストミックスが試行錯誤されている状況である。当面はwithコロナでの授業を余儀なくされるだけに、教員養成大学として、対面授業と遠隔授業のベストミックスを学校と共に追求していきたい。

謝 辞

本研究の一部は、JSPS 科研費（課題番号：18K02981「STEM 教育を指向した科学概念育成のための理科教材の開発と実践」、研究代表者：伊藤克治）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) (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).
- 4) すぐにできる! 双方向オンライン授業, 福村裕史, 飯箸泰宏, 後藤顕一編, 化学同人, (2020).

