

## 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 (3)

### In-Person/Remote Learning of Organic Chemistry Using a Wire-Frame Type Molecular Model (3)

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

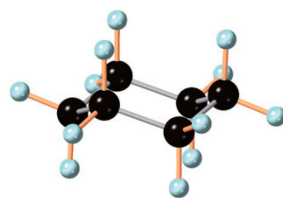
筆者はこれまでに、モールとストローで作成する安価で作成が容易なワイヤーフレーム型の分子模型を用いた授業実践について報告してきた。しかし、作成した分子模型の形が必要な要素を満たしているかの確認を学生自身がしていなかったため、提出された分子模型の出来具合にはばらつきがあった。そこで今回、シクロヘキサンの分子模型作成のためのループリックを作成し、出来上がった分子模型を学生間で相互評価して修正する対面/遠隔学習を行ったので、その実践内容について報告する。

#### 1. はじめに

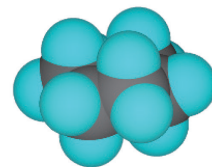
平成30年告示の高等学校学習指導要領解説 理科編「化学」の「(4) 有機化合物の性質 (ア) ⑦ 炭化水素」では、脂肪族炭化水素の性質や反応を、その構造と関連付けて理解させることがねらいとされている。そのために、「分子模型を用いて炭素骨格の形には鎖状のものと環状のものがあることを扱う」と示されている(下線は筆者による)<sup>1)</sup>。高等学校では環状脂肪族炭化水素の学習を通して、その分子の形や構造異性体を理解することが主な目的である。大学の有機化学では、さらに安定性や反応進行に影響する立体電子的效果を考えるために、有機分子の三次元構造を理解することが重要な目的となる。このような視点でシクロヘキサンの六員環構造を学び、E2脱離の反応機構や、 $\alpha$ -グルコース等の糖類の立体構造などの立体電子的效果を理解していく。

このため、本学で筆者が担当している専門科目(有機化学II)では、学生が分子模型を自分の手で組み立て観察し、立体構造を捉えるような授業を行っている。図1には、シクロヘキサンを例に、教育現場で用いられる分子模型として、球棒モデル、空間充填モデル、ワイヤーモデルの3つのタイプを示している<sup>2,3)</sup>。このうち、各原子を

“球”で表し、結合長を棒の長さで表した球棒モデルは、原子間の結合を見やすい長所がある。このため、中等教育の教科書では、主に球棒モデルで表されており、実際に学習者が手にする分子模型も球棒モデルが多い。ただし、球棒モデルにおける球はあくまでも便宜的なもので大きさに物理的な意味はなく、結合の長さが実際の分子の結合長を反映しており、大まかな分子の大きさを捉え



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

るモデルであることに注意が必要である。高等教育向けの教科書でも球棒モデルで説明されているものも多いが、少し複雑な分子になってくると見づらくなってくる短所がある。これに対して、空間充填モデルは分子の大きさと形が反映されており、実際の粒子に近いモデルである。このため、筆者らは3Dプリンターを用いた空間充填モデルの分子模型製作について報告している<sup>4)</sup>。ただし、このモデルでは原子間の結合が見づらいことが短所である。なお、有機反応の機構を書く際には構造式を使うため、構造式を三次元的に捉える分子模型としては、骨格を見やすいワイヤーモデルが便利であるといえる。

令和2年度の有機化学Ⅱは全ての授業を遠隔で行ったため、市販の分子模型を使うことができなかった。そこで、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独自に開発し、授業教材として初めて扱った。令和3年度は対面授業になったが、同じようにモールとストローで分子模型を製作させた。さらに令和4年度は、モールとストローで作成する分子模型に加えて、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）も扱った。これらの実践内容については、本紀要で報告した<sup>5)</sup>。しかし、学生がモールとストローで作成した分子模型の画像を撮影してレポートを提出し、教員が採点をして終了になっており、作成した分子模型の形が必要な要素を満たしているかを学生自身が確認をしていなかった。このため、提出された分子模型の画像では出来具合にばらつきがあった。

そこで令和5年度の授業では、シクロヘキサンの分子模型作成のためのループリックを作成し、出来上がった分子模型の形を学生同士の相互評価によって評価・修正する学習を行ったので、その実践内容について報告する。

## 2. 実践の流れ

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（15名）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】

まず、シクロヘキサンの構造（椅子型と舟形）の説明をした後、*trans*-デカリンと*cis*-デカリンの三次元構造が分かりやすいように六員環部分を椅子型で描くことを目標として示した。その後、

モールとストローを使ったシクロヘキサンの分子模型、市販品のワイヤーモデルを使ったシクロヘキサンの分子模型をそれぞれ作らせた。次に、市販の分子模型で作成したシクロヘキサンの分子模型を見ながら、モールとストローで作成したシクロヘキサンの分子模型の形を整える際の視点と内容（どこが、どうなっているか）を考えさせた。この結果を全体で共有し、分子模型を整えるための視点と内容を示したループリックの内容を確認した。このループリックを使って作成した分子模型について学生同士で相互評価を行わせ、その結果を踏まえて形を整えさせた。こうして作成した分子模型を持ち帰らせ、*trans*-デカリンと*cis*-デカリンの六員環部分を椅子型で描いたものを課題としてオンラインで提出させた。

### 【2回目】

前時の課題について説明した後、様々な角度から眺めたシクロヘキサンの骨格をニューマン投影式で描かせた。これを踏まえて、E2脱離が起こるための立体電子的効果について説明し、*trans*-および*cis*-1-クロロ-4-*tert*-ブチルシクロヘキサンのE2脱離ではシス体しか反応しないことについて、分子模型を見ながら考えさせた。

## 3. 実践内容と結果

### 3. 1. シクロヘキサンの分子模型の作成

まず、モールとストローを使ってシクロヘキサンの分子模型を作成させた。昨年度と同様に、市販のストロー（直径3.5×長さ150 mm）とモール（手芸用：約300×6×6 mm）を2本ずつ配布し、それぞれ四等分して用いた。作成方法の詳細はすでに報告<sup>5)</sup>しているので、ここでは省略する。同時に、市販のワイヤーモデルを使ってシクロヘキサンの分子模型を作成させた（図2）。学生にとっては、アキシアル位とエクアトリアル位を正しい位置に整えるのに苦労するので、市販のワイヤーモデルで作成したシクロヘキサンの分子模型と見比べて整えるように伝えた。

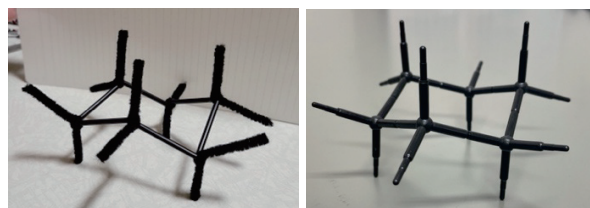


図2 モールとストローで作成した分子模型（左）、市販のワイヤーモデルで作成した分子模型（右）

### 3. 2. 相互評価による分子模型の調整

次に、市販のワイヤーモデルで作成した分子模型を参考にしながらモールとストローで作成した分子模型の形を整える際に、「どこが、どのようになっているのか」を考えさせた。これが正しい分子模型ができているかを評価する際のルーブリックに相当することになる。授業時に学生が分子模型を見比べながら評価規準を作成している様子を図3に示す。

最初は学生に自由に考えさせたが、苦慮する様子が見られたので、六員環の形、アキシアル位、エクアトリアル位の3つの視点で考えるように伝えた。学生から出た意見を紹介しながら、最終的に以下のルーブリックを示した(図4)。

このルーブリックを用いて、各自がモールとストローで作成した分子模型の出来具合について相互評価をさせた。まず、自己評価を行い、その後、二人一組でペアになって他者評価をさせた。その結果、3点満点の平均は、「六員環の形」は自己評価1.8、他者評価2.1、「アキシアル位」は自己評価2.0、他者評価2.3、「エクアトリアル位」は自己評価1.5、他者評価2.0であった。他者評価シートは評価者へメールで送付させて、自己評価と他者評価の結果をもとに、正しい構造になるように修正させた。授業終了後、出来上がった分子模型を持ち帰らせ、分子模型の形を参考にしながら、再度 *trans*-デカリンと *cis*-デカリンの六員環部分を椅子型で描くことを課題にして、オンラ

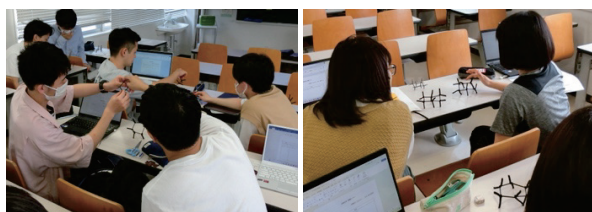


図3 分子模型を見ながら評価規準を考える様子

評点は以下の基準で3段階評価をする  
【3:全て満たしている、2:部分的に満たしている、1:まったく満たしていない】

視点	内容	評点	コメント
六員環の形	向かい合った C-C 結合が平行になっているか		
アキシアル位	一つおきに上下(鉛直)方向を向いているか		
エクアトリアル位	結合している炭素原子の隣から繋がっているシクロヘキサン環内の C-C 結合と平行になっているか		

図4 分子模型の出来具合を評価するルーブリック

インで提出させた(図5)。授業当初は *cis*-デカリンの構造を正しく描けている学生はいなかったが、課題ではほとんどの学生が正しい構造式を描くことができていた。

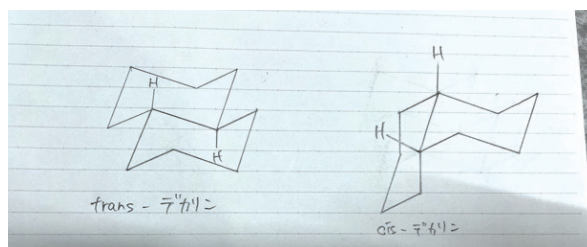


図5 提出された分子模型の画像

### 3. 3. シクロヘキサンの構造と有機反応

次の授業では、まず前時に作成したシクロヘキサンの分子模型を使って、C-C 軸から眺めた構造を描かせ、ニューマン投影図の説明をした(図6)。

これを理解させたところで、二分子脱離反応(E2 反応)では C-H 結合と C-X 結合の二面角が  $180^\circ$  であることが反応進行の条件になっていることを説明した(図7)。このように、教科書の図を使った説明だけではイメージしづらい有機反応の立体電子的効果について、分子模型を確認することで実感を伴った理解を図った。

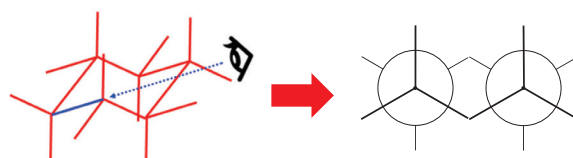


図6 シクロヘキサンのニューマン投影図 (1)

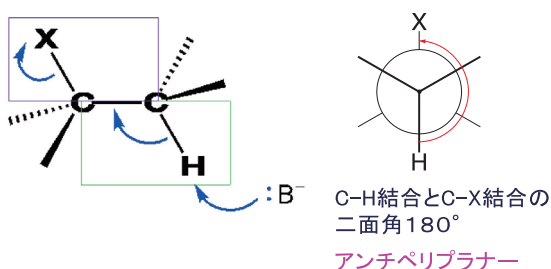


図7 シクロヘキサンのニューマン投影図 (2)

### 4. アンケート結果と考察

今回の授業の前後で行ったアンケートの結果を示す(図8)。「構造式から具体的な分子の形をイメージできる」については、事前の肯定的回答が40.0%であったが、事後は60.0%まで向上した。



ただ、Wilcoxon の符号順位検定を行ったところ、統計的に有意な上昇は見られなかった。しかし、「分子の三次元構造が分かる構造式を描くことができる」については、事前の肯定的回答が 33.3% しかなかったが、事後では 73.4% へ向上した。しかも Wilcoxon の符号順位検定では  $p < 0.05$  であり、統計的にも有意に上昇したことが分かった。このことから、実際に手に取ることができる分子模型を見ながら構造式を描く学習の有用性が確かめられたが、抽象的な構造式から具体的な分子の形をイメージできる力を付けるには、繰り返し体験しておく必要があるともいえる。

一方、「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、事前と事後共に「そう思う」と「ややそう思う」を合計した肯定的回答が 100% であった。ただ、細かく見ると、いずれの問いでも、事後アンケートでは「そう思う」の回答が少し低下していた。この理由としては、自由記述のアンケートでモールとストローで作成する分子模型は形を整えるのに苦労したという記述が比較的多かったことから、分子模型の作りにくさが影響したものと思われる。

次に、空間充填モデル、球棒モデル、ワイヤーモデルの分かりやすさについてのアンケート結果を図 9 に示す。事前の「分かりやすい」の肯定的な回答は球棒モデルが圧倒的に高く、86.6% であった。やはり、中学校と高等学校の教科書で見慣れている影響が大きいといえる。ワイヤーモデルについて感じていることの自由記述では、「原子も棒で表しているため理解しがたい」、「原子の

大きさの比較がしづらい」、「どこに何の原子があるのかが分かりにくい」など、原子が分からないという回答であった。球棒モデルは「分子の大きさ」の目安にはなるが、球の大きさに物理的な意味はなく、「原子の大きさ」を表していないことを認識していない可能性が示唆された。また、「ワイヤーモデルを見慣れてない」との回答もあり、教科書には掲載されていないワイヤーモデルが最も低いのは当然であるといえる。一方で、「原子間の結合や結合角などに注目したい場合には有効である」、「構造が複雑になるとワイヤーモデルの方が見やすい」など、構造が見やすいことの利点を挙げた回答も見られた。

今回の実践では空間充填モデルを使っていないため、事後アンケートにおいて空間充填モデルの回答にはほぼ変化は見られなかったが、「分かりにくかった」の回答が 33.3% から 6.7% へ低下したのは興味深い結果であるといえる。今回、分子模型を使って構造式を描く学習をしたことで、実際に手に取ったことのない分子模型でも、原子間の繋がりをイメージする力が一定程度は育つ可能性があるかと捉えることもできる。

球棒モデルについては、分かりやすさの肯定的回答が事後では 100% になった。また、ワイヤーモデルは事前の 20.0% から 93.3% に上昇した。これらの結果について、Wilcoxon の符号順位検定を行ったところ、球棒モデルでは元の値が高いために統計的な有意差は見られなかったが ( $p > 0.05$ )、ワイヤーモデルでは統計的に有意に上昇していることが分かった ( $p < 0.01$ )。

手作りのワイヤーモデルについて感じているこ

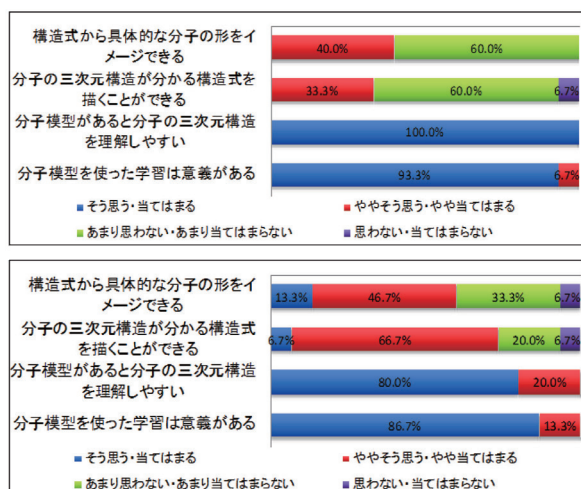


図 8 分子模型を使った学習のアンケート結果 (n=15, 上: 事前, 下: 事後)

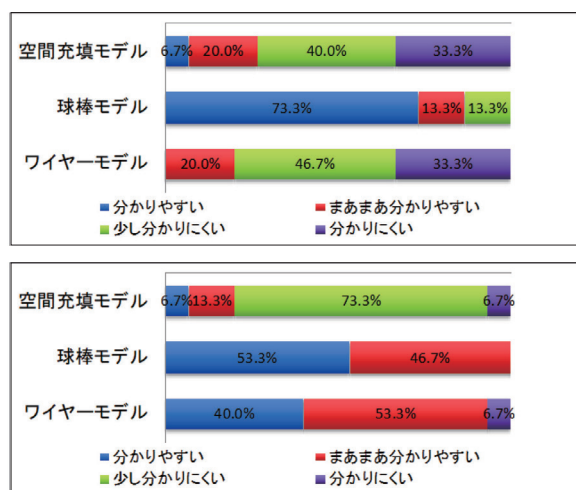


図 9 各分子模型の分かりやすさ (n=15, 上: 事前, 下: 事後)

との自由記述では、「動いてほしくない部分についても曲がったり、動いたりすることに少し不満を感じた」、「デメリットとしてモールが動くため形の維持が難しい点、作るのに時間がかかる点がある」など、柔軟性が高すぎることや作成に時間がかかることを短所として挙げている回答が一定数見られた。その一方で、「手作りのモデルは比較的予算を抑えることができ、かつ生徒全員分のモデルを準備することができる」、「家にあるもので容易に作成できる手作りのワイヤーモデルは、家庭学習で有機化合物の構造を確認したいときなどに便利である」など、モールとストローという入手しやすい材料で作成する分子模型の良さも挙げられていた。また、市販品のワイヤーモデルの短所として、「手作りで行ったような疑問が生じないこともまた事実であるため、一概に良いと言えない」、「あまり考えなくてもパズルのように当てはめていって、形を整えるとできてしまうため、構造を考えて組み立てるより、組み立てたらこんな形になったという感覚の方が強かった」など、簡単にできてしまうことで深く学ぶことにつながらないことを挙げていた。やはり、試行錯誤する経験が実感を伴って理解するために大切であるといえる。

今回はループリックを使った相互評価も行ったので、これについても自由記述で書いてもらった。「自分にはなかった他者の視点に気付くことができた」、「自分でどこを改善したらよいか分からないこともあるので、相互評価でどこをどのようになおしたらよいか分かることもよかった」、「視点が示されることで、「なんとなくできていた」というような状態から、「この部分はできているがこの部分はできていない」というように構造を多角的・多面的に見ることができるようになった」など、ループリック評価自体の良さと、これを相互評価として行う良さが挙げられていた。また、「交流することで印象に残り、忘れにくくなったと思う」のように、交流すること自体の良さも挙げられていた。実際、ほとんどの学生が相互評価の結果を踏まえて調整することで、目的の形に近いものを作成することができていた。

## 5. まとめと今後の展望

以上述べたように、ワイヤーモデル型の分子模型を作成することで、分子の立体構造が分かる構造式を描く力を育成することができたと考えている。また、適切な分子構造の形を評価するループリックを用いた相互評価活動を通して、分子の立

体構造の理解が深まることが分かった。

ただ、モールとストローを用いた分子模型は、入手容易な反面、柔軟性が高いために形を整えるのに苦勞し、時間がかかることも課題として残された。そこで、授業時間内で使うモデルとしては、形を整えるのに苦勞しない市販のモデルを使っており、授業時間外の学習の時間を使って、身の回りにある入手容易なもので分子模型を作成させて、理解をより深めるやり方がふさわしいと考えている。

分子模型は静的な状態を理解するためには有効であるが、有機反応機構の動的な状態を理解することは簡単ではない。動的挙動を理解するための動画と、ある瞬間の状態を理解するための分子模型の適切な組み合わせが必要である。このような視点で、これまでの実践の成果と課題を踏まえて、有機反応の動的な現象を理解するための教材開発に取り組みたい。

## 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); 「魅せる化学の実験授業」, 岩田久道, 後藤顕一編著, 新実験化学研究会著, 東洋館出版社, pp.74-77 (2011); 窪田好浩, 化学と教育, 第 68 巻, 第 4 号, pp.180-183 (2020).
- 3) 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).

- 4) (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).
- 5) (a) 伊藤克治, 福岡教育大学紀要, 第 71 号, 第 6 分冊, pp.1-5 (2022); (b) 伊藤克治, 福岡教育大学紀要, 第 72 号, 第 6 分冊, pp.13-18 (2023).