

発泡スチロール球を用いる分子模型作成の 化学実験への導入

松川 覚*・荒井香澄*

(2007年11月30日受理)

The introduction of the molecular model creating experiment using styrene foam sphere into the chemical experiment

Satoru MATSUKAWA* and Kasumi ARAI*

(Received November 30, 2007)

はじめに

小中学校において「理科離れ」や「学力低下」が問題視され、それに対して様々な議論・研究がなされ対策が講じられている。またこうした問題は小中学校に限らず、大学における基礎化学教育・化学教育においても同様である。実際、学ぶ側だけでなく、教える側も様々な工夫をおこなうべきとの指摘もなされている¹⁾。こうした背景のもと、我々は大学基礎化学教育における改善のひとつとして、基礎的な化学実験の見直しをおこなうことを考えた。現在、大学では基礎的な化学実験としては中和滴定、酸化還元滴定、アスピリンの合成などが良くおこなわれている。これら化学を学ぶ上で必要不可欠な実験に対して、これまでに無い新しい要素を持った実験として分子模型の作製実験を独立した1つの実験として導入することを考えた。分子の構造については理論的に学ぶものの、その構造を実感して学ぶという行為はおこなわれていない。しかしながら、分子の三次元的構造を実際に模型を作成するという行為を通じて論理的に理解することは意義深いと考えられる。分子模型の製作を化学実験として捕らえた場合、ただの工作活動になると敬遠しがちかもしれない。しかし、逆に化学を専門としない学生に対しては薬品を混ぜ合わせたり、機器を用いたりする従来の実験とは異なった新鮮さを感じさせることが出来、従来の実験では化学に興味を持てなかった学生が少しでも興味を持つことも出来るのではないかと期待した。

従来、分子模型は市販のものを用いて分子構造などを学ぶことが多い。しかし、自ら分子模型を作成することで、より深い学習効果が得られるであろうと考えた。さらに、専門の化学の授業において分子模型を提示して説明することも多いが、その際にも一度自分で分子模型を作成した経験を持っていれば、理解度の向上も期待できる。

*茨城大学教育学部理科教育教室化学研究室（〒310-8512 水戸市文京 2-1-1；Laboratory of Science and Chemistry, College of Education, Ibaraki University, Mito 310-8512 Japan）

分子模型を作製する材料としては発泡スチロール球を用いると素材が安価で細工しやすく、教材としての有用性が高いことから多くの研究がおこなわれている。^{2),3)}しかし、大学の独立した実験として実施可能と思われる手法は今まで知られていない。そこで我々は、1つの実験として授業時間内で実施可能な手法を開発することを目的とした。さらに、開発した手法を授業において実践し、その効果についても検証した。

実験の概要

今回、発泡スチロール球を用いる分子模型の作成を化学実験として導入する際、以下の2点を重視した。まずは、発泡スチロールに対して立体構造をイメージさせながら分子の立体的構造の特徴を論理的に理解、確認しながら製作させることである。また、分子がどのような構造であるか理解、確認することを目的とするために手先の器用・不器用という個人差があっても問題なく製作できる様な手法であることも重視した。この2点が達成できれば、有意義な実験となると考えた。実際のターゲットとして、エタン（アルカン）・エチレン（アルケン）・アセチレン（アルキン）の3つの分子を設定した。これらは高校で化学を履修していれば、化学Iの有機化学の脂肪族炭化水素の単元で習い、構造については大学の専門の有機化学でも一番はじめに学ぶ部分である。

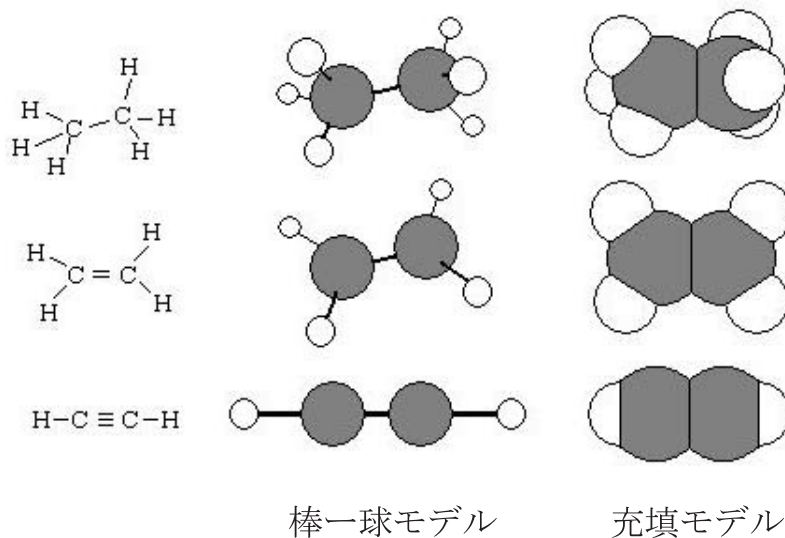


図1 化学実験にて作成する分子模型 上からエタン・エチレン・アセチレンの分子である

これまで報告された発泡スチロール球を用いた分子模型作成は、充填型のものがほとんどであるが、棒-球型の分子模型も分子の構造を論理的に理解するには重要であると考えられる。そこで、棒-球型、充填型の両方の分子模型の作成をおこなうことにした。したがって、棒-球型、充填型の両方の分子模型を同時に作成できる手法である必要がある。

発泡スチロール球を用いて分子模型を作成するためには球を組み立てるための手がかりが必要となる。その手がかりを作るための器具がこれまでもいくつか考えられている。今回我々は、分子模型を作成するそれぞれの構造の特徴である四面体構造・平面（三角形）構造・直線構造を効果的にイメージできる器具（以降、これをテンプレートと呼ぶ）を製作・利用してそれぞれの分子の模型を製作する実験を考えた。なお、この3つの分子がうまく製作できれば、他の分子も原理的にはその応用で製作可能となる。

テンプレートの作成

使用する発泡スチロール球の大きさは、市販の分子模型やこれまでの例を参考にし、 $1\text{cm} = 1\text{\AA}$ として実際の原子の大きさに近似したものを選択した。その結果、炭素原子は直径35mmのもの、水素原子は直径25mmのものとなる。これらのサイズの発泡スチロール球は容易に入手可能である。また発泡スチロール球は図2に示すとおりその製造工程の都合上、両端に2つの穴とそれを結ぶ赤道面に筋が入っている。これを利用して分子模型作成をおこなうことにした。まず、発泡スチロール球に対して立体的方向付けをおこなう。すなわち、4方向、3方向、2方向に結合手を伸ばす、その手がかりとなる起点をとることができるテンプレートをそれぞれ作成した。

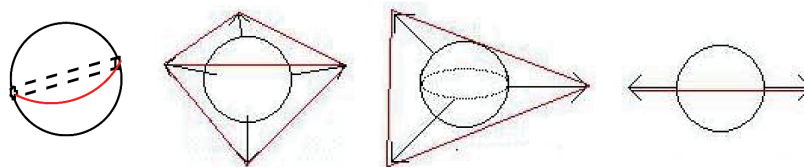


図2 発泡スチロールの構造（左）と4方向、3方向、2方向の立体的方向付けのイメージ（右）

アルカンテンプレートの作成

単結合のみの炭素原子の4本の結合手は、炭素原子上の均等に離れた位置から4方向に伸びる。これをイメージさせながら立体的方向付けを可能にするテンプレートとして球が内接する正四面体を設定した（図3）。球が正四面体に内接する4点は、球の表面上にちょうど均等に位置する。外側に向かって、正四面体のそれぞれの面と垂直となる等しい長さの線分をとり、その先端を結ぶと新たな正四面体ができるという相似を利用した。

正四面体を基本としたテンプレートは、塩化ビニル板（以下塩ビ板）で作成した。厚さ1mmの塩ビ板に $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 9.8\text{cm}$ （底辺）の三角形を3枚とる。次に、三角形の頂点から底辺に向かって垂線を引き、頂点から4.9cm、四面体と球の内接点にあたる場所に熱した釘を用いて穴を開ける。頂点は3mm程度ヤスリ等で切り落とし、四面体に組んだ際に、楊枝が通るほどの穴ができるようにする。三角形を張り合わせて図3の様に底面のない正四面体テンプレートを作成する。なお、この

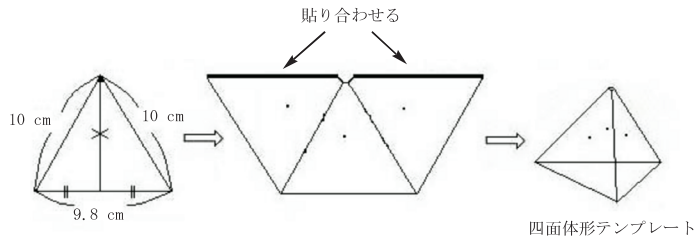


図3 四面体型のアルケンテンプレートの作成

テンプレートで組み合わせた三角形は一辺10cmの正三角形ではなく底辺を9.8cmと短くしている。これは、底辺が10cmとしてしまうと板の厚さの分だけ正四面体よりも広がってしまい、その結果、発泡スチロール球が理論よりも奥に入り込んでしまい、均等な方向付けが出来なくなるためである(図4)。

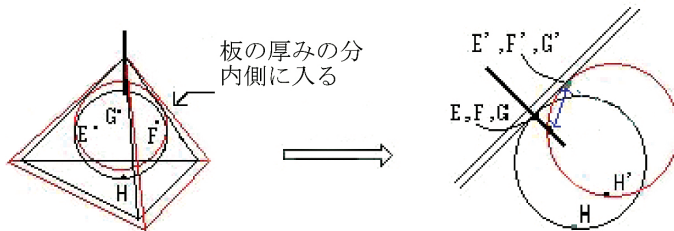


図4

発泡スチロール球への立体的方向付け(マーキング)は図5に示したようにおこなう。発泡スチロール球をテンプレートに入れ、四面体の頂点の穴に発泡スチロール球に元からあいている穴2つのうち片方楊枝で差し固定する。次にテンプレートと接する穴に楊枝を面に対して垂直に差し、結合手が出る位置として印をつける。これにより、アルカンの炭素を作成する際に必要な4方向への均等な立体的方向付けが可能となる。

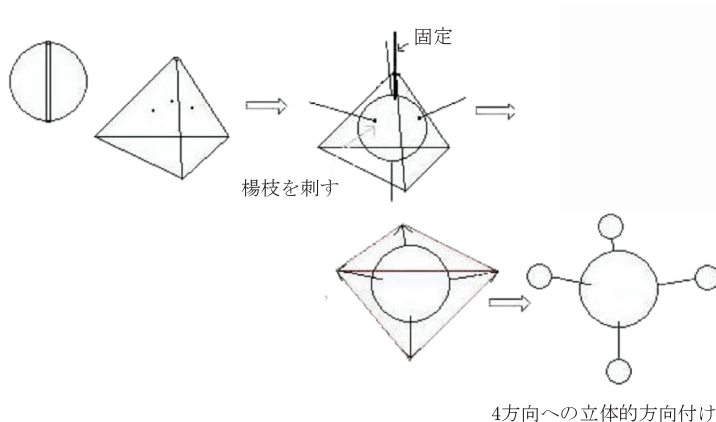


図5 アルケンテンプレートを用いた発泡スチロールへの立体的方向付け

アルケンテンプレートの作成

二重結合を持つ炭素原子の3本の結合手は炭素原子の均等に離れた位置から3方向に伸びる。よって、分子の構造は正三角形構造を基本とした立体構造である。これをイメージさせながらマーキングを可能にするテンプレートとして円筒型のテンプレート(内接三角形)と三角柱型テンプレート(外接三角形)の2つが考えられた。しかし、三角柱型テンプレートでは球をうまく支える事が出来なかったため、円柱型テンプレートを作成することにした(図6)。

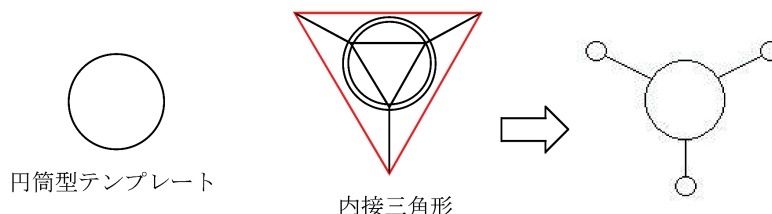


図6 アルケンテンプレートの概略

円柱型テンプレートは、OHPシートで作成した。縦2.0cm×横11.1cmの長方形を切り取る。次に長方形の真ん中に線を引き、その線上に3.7cmごとに印しを付け、これを熱した釘で穴を開ける。そして両端を貼り合わせて円柱を作る(図7)。円柱の真ん中の線と発泡スチロール球の赤道面を合うように差し込み、球に元からあいている穴とテンプレートの3つの穴のうち、1つの穴をに合わせて楊子で固定する。スチロール球の赤道面とテンプレートの線が合っているのを確認し、残りの2つの穴に楊子を差し込みマーキングする。これにより3方向に均等に立体的方向付けが容易に可能となる。また、このテンプレートにより芳香族の炭素の立体的方向付けもおこなうことが出来る。なお、アルキンの場合には発泡スチロール球に元から開いている穴を利用して2方向に180°離れた方向付けが出来るのでそのまま用いることが出来る。

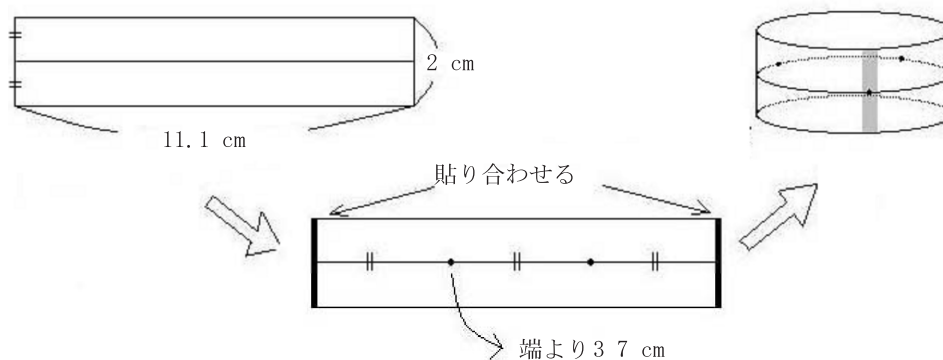


図7 アルケンテンプレートの作成

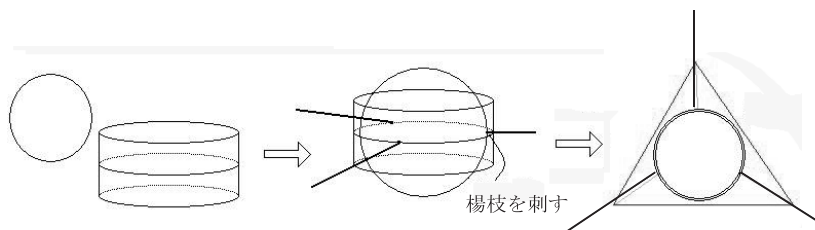


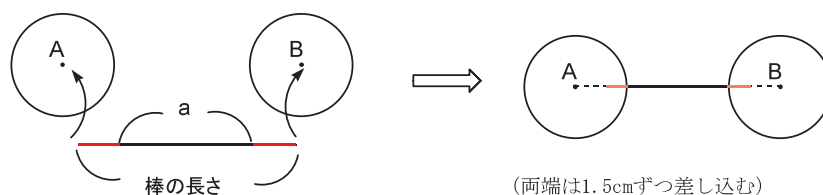
図8 アルケンプレートを用いた発泡スチロールへの立体的方向付け

棒-球型模型の作成

上で述べたプレートを用いることで発泡スチロール球に立体的方向付けが可能となった。次に実際の分子模型作成について検討した。棒-球型の場合には発泡スチロール球に差し込む棒の長さの設定や差し込み方、充填型の場合には球を切断して接着する際の切断面の取り方、切断の仕方などを考慮した。

まず、棒-球模型を作成するには二つの球をつなぐ棒について設定しなくてはならない。棒としては工作用の竹ひご（直径 1.8mm）を用いた。二つの球の中心間の距離を $1 \text{ \AA} = 3\text{cm}, 4\text{cm}, 5\text{cm}$ の3種類のものを検討した結果、 $1 \text{ \AA} = 4\text{cm}$ がバランス、強度、見栄えともに良く、この長さに決定した。これを基に炭素-炭素間、炭素-水素間のそれぞれの結合を作る為の棒の長さを下の図7のように設定した。なお小数点以下は四捨五入で近似した。AB間の距離からそれぞれの球の半径を引いたものが見える部分 (a) となる。また、棒を差し込む際には安定のため 1.5cm 球に差し込む。この差し込む長さを足したものを棒の長さとした。

模型の作成はする際に注意するべき点としてはプレートを用いて正確に方向付けをしても棒



	AB間の距離 (原子間距離)	棒の長さ	a
C-C (アルカン)	6.2 cm	5.7 cm	2.7 cm
C-C (アルケン)	5.3 cm	4.8 cm	1.8 cm
C-C (アルキン)	4.8 cm	4.3 cm	1.3 cm
C-H (共通)	4.9 cm	4.4 cm	1.4 cm
C-C (芳香族)	5.6 cm	5.1 cm	2.1 cm

図9 棒-球モデルの作成：棒の長さの設定

を差し込むときに斜めに差し込んでしまうと、出来る模型は歪みを生じてしまう。それをなるべく解消するためには図10のように棒を差し込む場合にはマーキングした穴を上に向けて垂直に差し込む様にするが良い。これは一見当たり前のようであるがこの差し込み方を指示することで出来る棒-球模型の歪みが最小に抑えることが出来る。このようにして、エタン・エチレン・アセチレンの3つの分子の棒-球モデルの作成をおこなった。

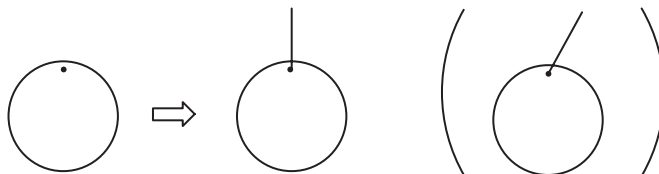


図10 棒の差し込み方、穴を真上に向けることが重要

充填型模型の作成

充填型模型を作成する際には球と球が重なり合う箇所を切断しなければならない。切断する切り口の大きさは、2原子間の結合距離と原子半径(ファンデルワールス半径)から求めることができる。本実験では化学便覧の値から求めた値および市販の充填型分子模型(中村理化工業製)の切断面の大きさを参考にして発泡スチロール球の場合へと近似して表1の様に設定した。切断面の大きさが決まったら、次に発泡スチロール球にコンパスを用いて切断面をとる。コンパスであれば、1mm単位で対応することができ、様々な大きさに容易に対応可能である。方向付けした穴を上に向けそこにコンパスの針を垂直に差し込み垂直に回し印を付ける(図9)。充填模型の場合、方向付けした角度に対していかにもうまく切断面をとるかが鍵となるが、それもコンパスの針をマーキングした位置に合わせることで解決できる。コンパスで付けた印は切断しやすいようにマジックペンでなぞる。

切断面(直径)			
C-C(アルカン)	2.5 cm	C-H(共通)	2.4 cm
C-C(アルケン)	2.7 cm	C-C(芳香族)	2.7 cm
C-C(アルキン)	3.0 cm		

表1 切断面の設定

次に切り口に合わせて切断する。切断には、ニクロム線を用いた発泡スチロールカッターを使用する。発泡スチロールカッターは、ホームセンターなどで比較的安価に入手できる。充填模型の作成において、この切断作業は切断面がなるべく水平にならなくてはいけない為に一番出来栄えに個人差が出やすい。そこで、なるべく個人差が出ないようにするために、切断面の大きさに合わせて、工作用紙に円をとってくりぬき、それを球にはめ込み、カッターをそれに押し当て切断する。これにより、きれいに発泡スチロール球を水平に切断することができる。切断した発泡スチロール球をボンドで貼り組み合わせることで充填模型が作成できる。

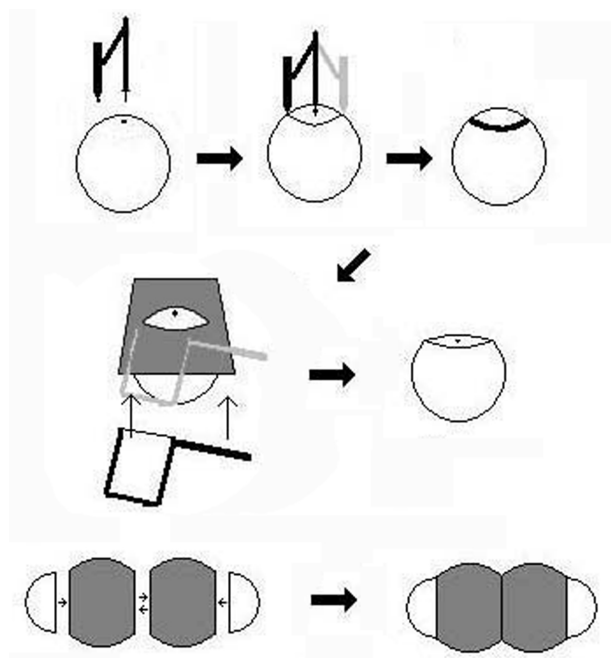


図11 充填模型の作成の概要

実践とまとめ

ここまでで述べた分子模型の作製実験は約3時間程度でおこなえるものである。以下実際に化学実験において実践した結果について述べる。

茨城大学教育学部において5年前より化学実験の中で独立した1つの実験として分子模型の作成実験を取り入れている。そのなかで観られたいくつかの問題点を解決、改善して本論文で述べた分子模型作成法を確立した。昨年度の実験より本手法でおこなっているが、受講生は上記の手法で2つのテンプレート、6つの分子模型を作成している(図10)。さらに、2年間に受講した学生計79名に対しアンケート調査をおこなった。そのうち化学IB(当時)を最後まで履修したものは31名であった。「化学実験として意義があると思う」「分子の構造が理解できたか」「模型作成は容易であったか」の3つについて5(そう思う)から1(そう思わない)までの5段階で評価および自由記述をおこなった。その結果、「意義」については平均4.01($\sigma = 0.72$)、「構造の理解」については平均4.63($\sigma = 0.51$)であった。また、「作成」については平均3.67($\sigma = 1.12$)と若干評価にばらつきがあるいずれも十分に高い値であると評価できる。

また、自由記述には「頭で考えている(知っている)のと実際に作成するのではイメージが違う、構造が再確認できる」という内容の記述が多く観られ(29名)特に化学履修者に顕著であった(22名, 71%)。また、化学未習者からは「いつもの実験と違い新鮮である」(15名)、「分子模型が作れてびっくり(うれしい)」「分子の構造の違いが作りながら理解できた」(各10名)という内容の意見

が観られ、こうした結果から、本実験が化学既習の学生、そうでない学生いずれに対しても有効な教育効果があることが確認できた。また、「うまく作れた、うまく作れなかった」という内容の記述は合わせても10名以下であり、このことから本実験がただの工作活動で終わっていないことが見て取れる。

なお、本学部では引き続き有機化学の講義をおこなっている。その際、分子の構造や立体選択性に関する授業において分子模型を用いて説明をしているが、授業も非常にスムーズに行え、また生徒の理解度も高い。

もちろん高校の化学実験としても扱うことは可能である。実際、筆者らはこの実験を水戸第二高等学校数理科学同好会の生徒12名対象にテンプレートの作成とエタン・エチレン・アセチレンの分子模型の作成実験をおこなった。時間はかかったものの、分子の模型を正しく作成する事が可能であった。ただし、時間の都合上授業内で取り扱う為には工夫が必要となる。

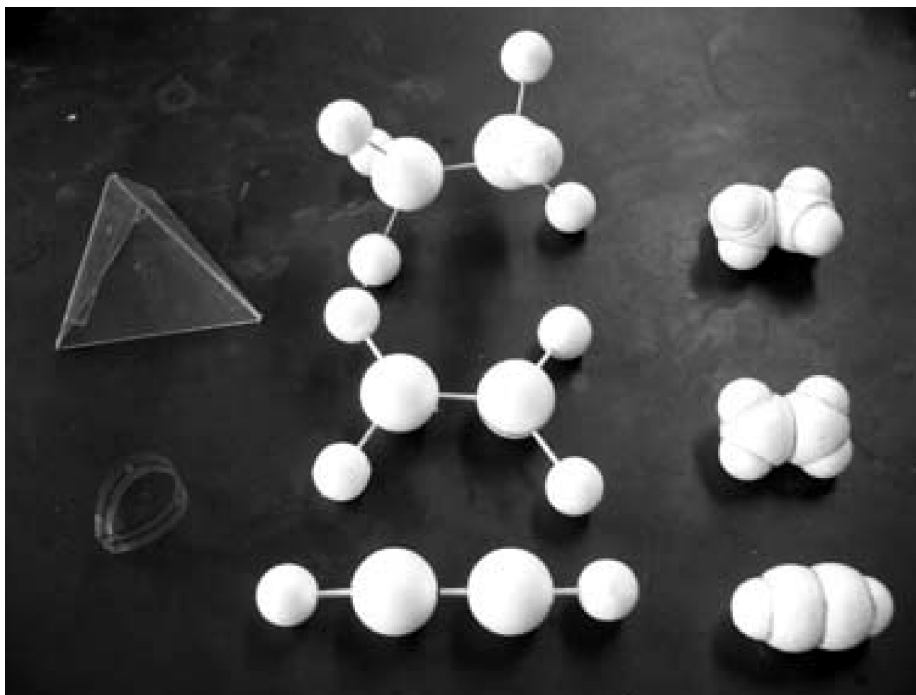


図12 作成したテンプレートと分子模型、いずれも学生が実験で作成したもの

また、この分子模型の応用として上記の簡単な分子だけでなく、複雑な分子模型の作製も可能である。図13は環境学習の際によく取り扱われる分子であるダイオキシンとDDTの分子模型である。これらの分子も、今回作成したテンプレートを用いる事で容易に作成する事が可能である。このように基本的な分子だけでなく、身近な物質に対してその模型を作成する事にも応用することが容易である事も本手法の特長である。

本研究では、独立した1つの化学実験として実施可能な統一的な分子模型作成実験の開発とその

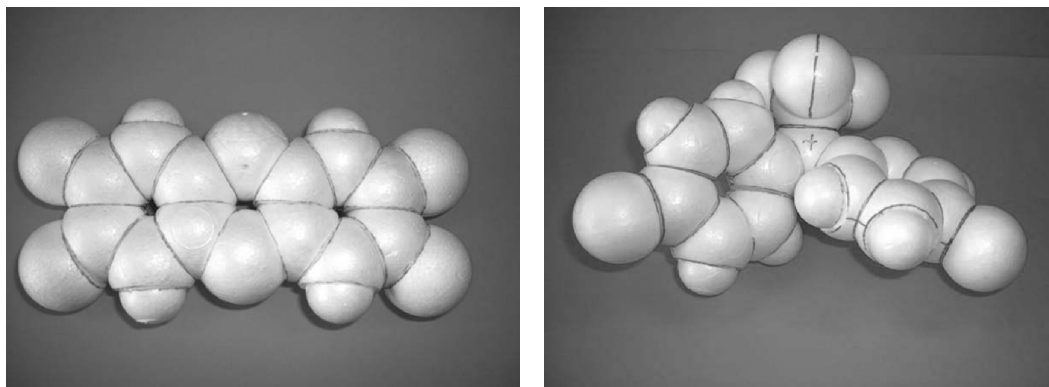


図13 応用例：ダイオキシン（左）と DDT（右）

実践を目的とした。内容としては立体的方向付け可能なテンプレートの作成とそれを用いると棒一球モデル，充填モデルの作成からなる。本実験において，分子模型を自ら実際に作成することで分子構造，特に分子の3次元的な構造を効果的に理解・再確認することができる。また，実践と事後のアンケート調査により化学既習の学生，未習の学生いずれに対しても有効な教育効果があることも明らかになった。こうしたことから，本実験は作成法にはまだ改善の余地はあるかもしれないが，大学の（基礎）化学実験として取り入れてみる価値は十分にあると考えている。

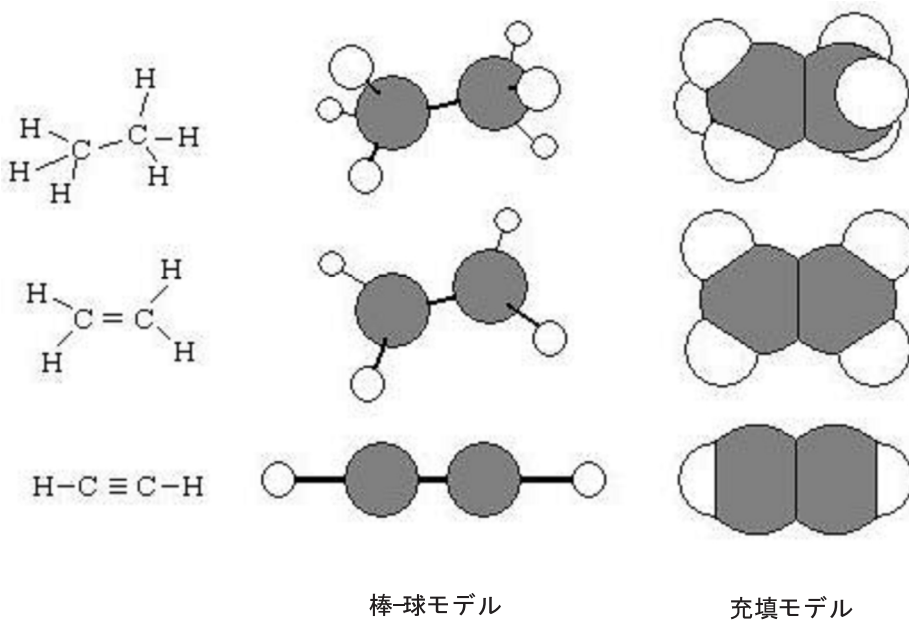
注

- 1) 小林啓二，化学と工業，**53**，1444（2000）
- 2) (a) 「発泡スチロール球で分子模型を作ろう」平尾二三夫，板倉聖宣，仮説社（1992）.
 (b) 利安義雄，全国理科教育センター研究発表会研究発表（1994）.
 (c) 池平英之，佐藤和行，化学と教育，**49**，637（2001）.
 (d) 山口和美，笹村泰昭，化学と教育，**50**，470（2002）.
- 3) インターネット上にもいくつか実践例が報告されている
 例えば，
 (a) <http://www.geocities.jp/ichirokasetu/>
 (b) <http://asaitou-web.hp.infoseek.co.jp/r2000/0807/>
 (c) http://www.edu.pref.ibaraki.jp/center/zyouhou/sozai_db/kagaku/3/bunsi.htm

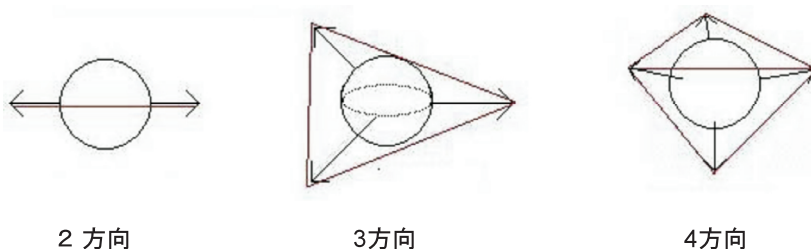
参考資料 本学化学実験 I 「分子模型の作製」の実験テキスト

分子模型の作製

分子模型を作成することは有機分子の構造の特徴を知るためには重要である。
 だから今日の実験では発泡スチロールを用いて分子模型の作製をおこなう。
 作成する分子は、エタン（アルカン）・エチレン（アルケン）・アセチレン（アルキン）
 の3つである。それぞれについて、棒-球モデルと充填型モデルを作成する。

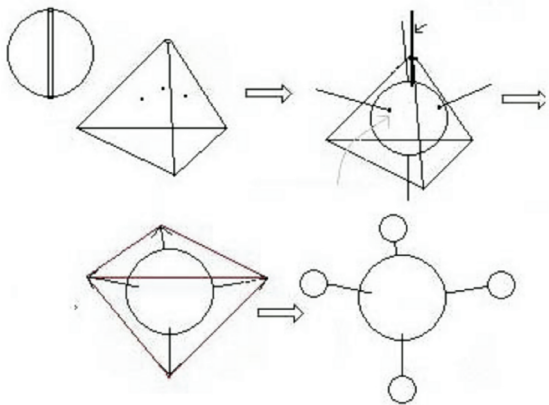


上記のモデルを作成するには発泡スチロール球へ立体的方向付けをおこなう必要がある。



棒一球 モデルの作成

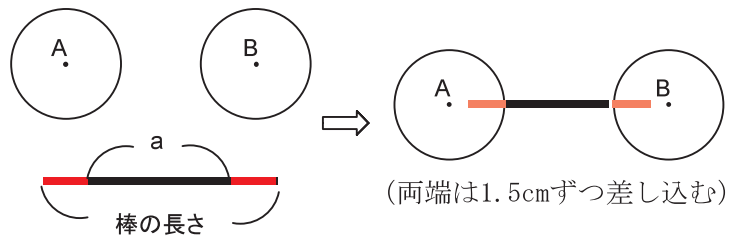
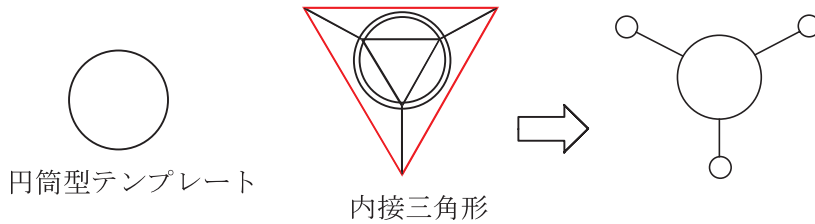
アルカン



発泡スチロールをテンプレートに入れて楊子を差し込む

そこに竹ひごを下の表の長さに合わせ切って差し込む。

アルケン



	AB間の距離 (原子間距離)	棒の長さ	a 棒の長さ (見える部分)
C-C (アルカン)	6.2 cm	5.7 cm	2.7 cm
C-C (アルケン)	5.3 cm	4.8 cm	1.8 cm
C-C (アルキン)	4.8 cm	4.3 cm	1.3 cm
C-H (共通)	4.4 cm	4.4 cm	1.4 cm
C-C (芳香族)	5.6 cm	5.1 cm	2.1 cm