

4 小単元「分子と共有結合」に関する指導事例

I 科目「化学基礎」の中で扱う小単元「分子と共有結合」について

現行の学習指導要領の科目「化学Ⅱ」における小単元「化学結合」で扱っていた「分子の極性」を、新学習指導要領の科目「化学基礎」における小単元「物質と化学結合」で扱うことになった。新学習指導要領解説には、「その（分子からなる物質の）性質については、融点、沸点、溶解性などを扱い、構成原子の電気陰性度と関連付けて分子の極性に触れる。」と記載されている。また、これまで科目「化学Ⅰ」の小単元「無機物質」で扱っていた「分子からなる物質の性質」を科目「化学」で扱うことになったものの、科目「化学基礎」の本単元においても、学習指導要領解説には、「分子からなる物質の性質の例として、代表的な無機物質については、水素、酸素、・・・、ベンゼンなどを扱う。」と記載されているのに加え、実際に水素やアンモニアを発生させて性質を調べる実験なども例示されており、科目「化学Ⅰ」に比べ、より広く深く扱うことが求められている。

ここで留意すべきことが、2点考えられる。1点目は、極性分子と無極性分子の性質を比較するために、現行の学習指導要領の科目「化学Ⅱ」においてこれまで生徒実験や演示実験で行っていた「極性溶媒、無極性溶媒への溶解性を調べる実験」が簡単には実施できないことである。それは、分子からなる物質の溶解性は、溶媒分子と溶質分子の間の相互作用と切り離せないにもかかわらず、科目「化学基礎」では分子間力の詳細（ファンデルワールス力や静電気力、水素結合）を扱わないからである。一方で、前章（p.7）で報告したように、新学習指導要領解説での例示をはじめ、半数以上の教科書で当該実験が扱われていることも事実である。

2点目は、分子からなる物質について指導する上で、どのくらい多くの数の物質を、どこまで深く指導すればよいか判断が難しいということである。これに関しては、最小限の数の物質を取り上げてそれぞれの最低限の性質を一覧表にまとめている教科書もあれば、数頁を割いて、現行の科目「化学Ⅰ」とほぼ同様に各物質の性質を扱っている教科書もある。次頁の表は、出版社5社、計12種類の教科書で、本単元において分子からなる物質をどの程度扱っているかをまとめた表である。指導する生徒の実態や進路希望に応じて柔軟に扱えばよいのだが、生徒の実態を的確に把握し、明確な評価規準を設定し、綿密に指導計画を立てること無しに、いたずらに多くの物質の性質についてこれまで同様の指導を行っていくと、限られた時間数で「分子からなる物質」の核となる部分を身に付けさせることが困難になってしまう。

そこで、本調査研究では、まず、これまで生徒実験に用いられることが少なかった市販の分子模型を用い、共有結合や分子について理解させる指導法を検討し、実践した。さらに、分子からなる物質の融点、沸点、溶解性等の性質について探究させるという試みを行った。この内容は、新学習指導要領の科目「化学」における単元「物質の状態と平衡」で扱うことにもなっているが、2種類以上の分子間の相互作用を考慮しなければならない「溶解」の現象でなく、前の単元「化学と人間生活」の「熱運動と物質の三態」の指導内容を生かし、単一の分子間の相互作用だけを考慮すればよい「三態変化」の現象で極性・無極性を扱う方が理解させやすいものと考えた。ただし今回の調査研究においては、現行の教育課程における科目「化学Ⅰ」と科目「化学Ⅱ」で分割して履修する生徒に指導する内容であるので、それぞれの科目を履修している1学年と3学年で、活動内容を多少変えて実践した。また、生徒実験・演習において、市販の分子模型だけで対応しにくい共有結合の結晶に関しては、今回の調査研究を通して考案した新しい種類の模型の作製方法と、その活用法を紹介する。

小単元（小項目）「分子と共有結合」において分子からなる物質の扱い（高分子化合物を除く）

物質名 (無機物質)	学習指導要領 解説で例示	掲載教科書数 ^{注)}		物質名 (有機化合物)	学習指導要領 解説で例示	掲載教科書数 ^{注)}	
		A	B			A	B
水素	○	8	4	メタン	○	8	4
ヘリウム		1	0	プロパン		1	0
窒素	○	7	4	ブタン		1	0
酸素	○	8	4	ヘキサン		1	1
オゾン		1	0	エチレン	○	6	4
塩素		3	0	アセチレン		1	0
ヨウ素		1	0	エタノール	○	8	4
アンモニア	○	7	4	酢酸	○	8	4
水	○	3	3	アセトン		1	0
過酸化水素		1	0	ベンゼン	○	7	4
塩化水素	○	7	4	トルエン		1	0
一酸化炭素		1	0	ナフタレン		1	0
二酸化炭素	○	8	4	注) 掲載教科書数については、本文中で数行にわたって 詳しい説明をしているものを「A」、表などで必要最小 限の内容を扱っているものを「B」としている。			
一酸化窒素		0	1				
二酸化窒素		2	1				
二酸化硫黄		2	0				

II 小単元「分子と共有結合」の展開例（指導計画案）

1 単元（大項目）「物質の構成」の目標（学習指導要領）

原子の構造及び電子配置と周期律との関係を理解させる。また、物質の性質について観察、実験などを通して探究し、化学結合と物質の性質との関係を理解させ、物質について微視的な見方ができるようにする。

2 小単元（中項目）「物質と化学結合」のねらい（学習指導要領解説より）

イオン結合、金属結合、共有結合とそれらの結合でできた物質の性質について観察、実験を行い、物質の性質が化学結合により特徴付けられることを理解させる。

3 小単元（中項目）「物質と化学結合」の評価の観点（例）

(1) 関心・意欲・態度	(2) 思考・判断・表現	(3) 観察・実験の技能	(4) 知識・理解
<ul style="list-style-type: none"> ・イオン結晶の水溶液及び融解塩の電気伝導性を調べる演示実験や分子からなる物質を生成して性質を調べる演示実験を観察し、イオン結合や共有結合について意欲的に探究しようとする。 ・代表的な金属の性質や日常生活の中での用途を確認し、金属結合について関心を高めている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・イオンの生成、イオン結合、金属結合、共有結合の原理を、電子配置をもとに考察している。 ・結合している原子の組み合わせから、どの種類の結合が生じているか適切に判断している。 ・分子や共有結合の結晶のモデルを基に、粒子の配列のようすを図や構造式で表現している。 	<ul style="list-style-type: none"> ・分子模型で分子や共有結合の結晶のモデルを組み立てながら、模型の使い方等自身に付けるとともに、分子や結晶の特徴を探究する方法を習得している。 	<ul style="list-style-type: none"> ・イオン結合、金属結合、共有結合について、それぞれの特徴と、結合に電子がどのように介在するかを理解している。 ・イオンの生成の原理や、イオン結合、金属結合、共有結合でできた物質の性質をそれぞれ整理し、それらの知識を身に付けている。

4 小単元（中項目）「物質と化学結合」における小単元（小項目）「分子と共有結合」の展開（例）

時間	学習内容	ねらい〈評価規準〉	具体的な学習到達目標	評価（評価方法）
1.5時間	<p>分子と共有結合</p> <p>【実験・演習】 分子模型で分子を理解しよう</p>	<ul style="list-style-type: none"> 共有結合の原理を電子配置をもとに考察し、結合に電子がどのように介在するかを理解し、知識を身に付けている。 〈思考・判断・表現〉 〈知識・理解〉 分子模型で分子や共有結合の結晶のモデルを組み立てながら、模型の使い方等を身に付けるとともに、分子や結晶の特徴を探究する方法を習得している。 〈観察・実験の技能〉 	<ul style="list-style-type: none"> 共有結合を電子配置と関連付けて理解するとともに、共有結合は共有電子対を形成した結合であることを理解し、知識を身に付ける。 分子を分子式、電子配置図、電子式、構造式で表現できるようになる。 分子模型を使用して各分子の形を表現することができるようになる。そして共有結合の種類と結合する向きとの関係等について探究する方法を身に付ける。 配位結合や原子の電気陰性度と分子の極性についての基本事項を理解し、知識を身に付ける。 	<ul style="list-style-type: none"> 電子配置図や電子式を描いて共有結合の原理を考え、理解している。 (行動観察、授業評価シート) 分子式、電子配置図、電子式、構造式を正しくかけている。 (ワークシート、ノート、確認テスト) 分子模型を適切に使用し、組み立てたモデルから、分子の特徴を探究している。 (行動観察、授業評価シート)
1.5時間	<p>【演習・実験】 分子からなる物質の分子の形と物質の性質との関係を考えよう</p>	<ul style="list-style-type: none"> 分子や共有結合の結晶のモデルを基に、粒子の配列のようすを図や構造式で表現するとともに、分子の形と分子からなる物質の性質の関係を徹底的に探究し、導き出した考えを的確に表現している。 〈思考・判断・表現〉 	<ul style="list-style-type: none"> 共有結合でできた物質の性質を理解する。特に、分子からなる物質については、極性の有無や極性と物質の性質との関係を考察し、モデル図などで表現しながら実験レポートに適切にまとめる。 	<ul style="list-style-type: none"> 分子の形の特徴を的確にとらえ、分子の極性の有無を判断できている。また、グラフやモデル図を描き、極性分子と無極性分子の性質の違いを探究し、導き出した考えをレポートにまとめている。 (行動観察、演習レポート)
1時間	<p>【実験】 炭素の同素体の模型を作ろう</p>		<ul style="list-style-type: none"> ダイヤモンド、黒鉛、及びフラーレンの模型を作製し、共有結合の結晶の原子配列を分子と比較しながら整理して理解し、知識を身に付ける。 	<ul style="list-style-type: none"> 炭素の同素体の模型を作製し、共有結合の結晶の特徴及び分子と結晶の違いを理解している。 (実験レポート、確認テスト、学習の振り返りシート)

*本調査研究では、1～3時間目の内容を実践した。

Ⅲ 〈指導事例(1)〉実験・演習「分子模型で分子を理解しよう」

1 授業展開（実験・演習の進め方）

(1) 共有結合と分子に関する説明

①希ガス以外の非金属原子同士で電子を共有しての安定化

二つの塩素原子が安定なアルゴン型の電子配置になるための電子のやりとりについて考察させ、考えたことを発表させる。

*塩化ナトリウムのイオン結合形成の際の電子の授受と比較させながら理解させる。

②単結合・二原子分子の単体

塩素分子を電子配置図で理解させる。分子式、電子式、構造式で分子を表現できるようにする。(水素分子で、定着しているかを確認させる。)

*塩素原子における価電子の授受による安定化については小单元「イオンとイオン結合」で学習しており、周期表第2周期以降の一般的な原子の電子式を理解させるために、塩素分子で説明する。また、塩素分子は中学校で学習している。

③単結合・二原子分子の化合物

塩化水素分子を電子式で理解させる。

④単結合・多原子分子の化合物(原子価2以上の原子の共有結合)

水分子を電子式で理解させる。

⑤多重結合・二原子分子の単体

酸素分子を電子式で理解させる。

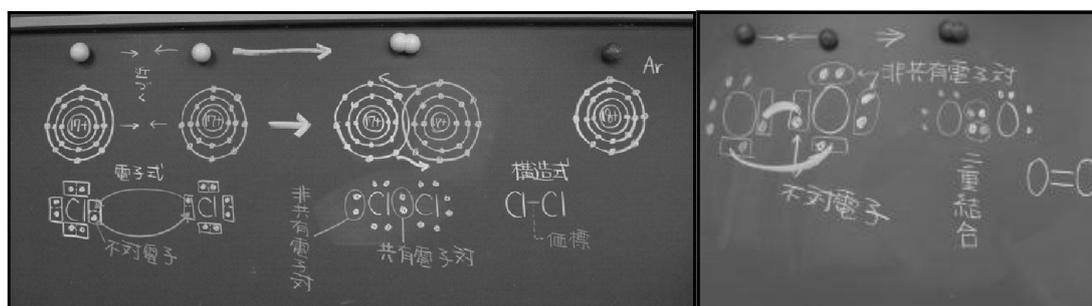


写真1 単結合、各化学式の説明

写真2 二重結合の説明

(2) 分子模型を用いた実験・演習

①分子模型の使用方法の確認

分子模型の特徴を理解させる。特に、単結合するとき (sp^3 混成軌道)、二重結合するとき (sp^2 混成軌道) の酸素、窒素、炭素の結合の向きを確認させる。

*本調査研究の協力校では、空間充填型の模型を授業で使用している。結合の種類に着目させたいときは、棒球型の模型を使用する方がよい。

②分子模型の作製

主な分子について分子模型でモデルを作製させ、共有結合の特徴から分子の形までを理解させる。ワークシート(次頁)に必要事項を記入させる。

③炭素分子の存在の可否の検討(発問)

炭素原子の模型パーツだけを使って炭素分子のモデルが作製できるかを試行させ、炭素分子が存在するかどうかを考えさせる。

■ワークシート例

[まとめ] 主な分子の電子式、構造式、分子モデル

物質名 (分子式)	共有結合ができるようす	電子式	構造式	分子模型の スケッチ図
水素 ()				
塩素 ()				
塩化水素 ()				
水 ()				
アンモニア ()				
メタン ()				
二酸化炭素 ()				
酸素 ()				
窒素 ()				

(4) 共有結合の結晶についての説明

①共有結合の結晶の特徴

ダイヤモンド、水晶などの原子配列を、模型（写真3）を提示しながら理解させる。

②共有結合の結晶と分子との相違点の確認

ダイヤモンドとメタン等を比較しながら、性質の違いや、化学式での表現方法の違いなどを確認させる。

*「炭素の同素体の模型」を作製させてから、ダイヤモンドとC₆₀を比較させるのもよい。

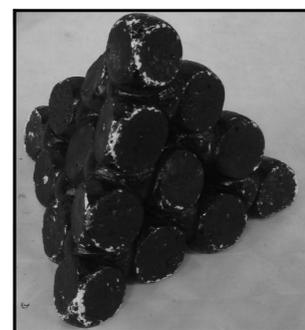


写真3 ダイヤモンドの模型（例）

(5) 配位結合についての説明

①分子内の非共有電子対の分布、水素イオンの電子配置

棒球型分子模型で作製したアンモニア分子を提示し、非共有電子対の存在やその分布の向きを確認させる。また、水素イオン（プロトン）の電子配置を確認させ、水素分子と比較させながら安定性を考えさせる。

②配位結合の形成

電子式を用いて、アンモニウムイオン及びオキソニウムイオンの形成について説明する。

*錯イオンについては、その存在について簡単に説明するにとどめる。

(6) 電気陰性度と分子の極性についての説明

①電気陰性度、結合の極性

塩化水素分子を例に、異なる原子間の共有電子対の分布の仕方について簡単に説明する。原子間の共有電子対の偏り（結合の極性）は、電気陰性度を利用すると判断できることを確認させる。

②分子内の極性

塩化水素分子では、結合の極性により、水素原子と塩素原子の表面が、異なる種類の静電気を帯びていることに気付かせる。

*塩化水素の結合の極性を極端にしていくと、水素イオンと塩化物イオンになることを電子式で考えさせ、イオンと比較しながら各原子に帯びる静電気について理解させるとよい。

③極性分子と無極性分子

水分子と二酸化炭素分子の分子模型を提示しながら、分子の形の対称性に注目させ、分子内の原子間の静電気の分布の偏り（結合の極性）と分子全体の静電気の偏り（結合の極性の相互作用による分子の極性）の違いについて理解させる。

*この後使用する**演習・実験プリント例（2）**（p. 44）の空欄を記入させ、理解したことを定着させる。

2 実践後の振り返り

(1) 分子模型を用いた実験・演習の様子

本調査研究では、現行の学習指導要領の科目「化学 I」で実践したので、配位結合や分子の極性についての指導は行っていない。要した時間は約65分程度であったが、どの生徒も終始意欲的に取り組んでいた。班単位で作業を進めた実験・演習の場面では、分子模型を使って作業を進める時間に個人差があり、早く終わってしまう生徒もいたので、作業が速い生徒のために発展的な課題を用意したり、探究を深める材料を用意しておいたりするなどの工夫が必要であった。



写真4 授業の様子



写真5 分子モデルの組み立て



写真6 ワークシートに記入

(2) 生徒が記入したワークシート

生徒がまとめたワークシートを紹介する。どの生徒も適切に記入していた。分子模型のスケッチは、「あくまでもモデル図であり、写実的な絵を描く必要はなく、立体的に形の特徴をとらえるために簡潔に描くことが重要である」ことを指示しておいた方がよい。

■二人の生徒がそれぞれ記入したワークシート

名称 (分子式)	共有結合ができる様子	電子式	構造式	分子模型
水素 (H_2)	$H \cdot H \rightarrow H:H$	$H:H$	$H-H$	
水 (H_2O)	$H \cdot \ddot{O} \cdot H \rightarrow H:\ddot{O}:H$	$H:\ddot{O}:H$	$H-O-H$	
アンモニア (NH_3)	$\cdot\ddot{N}\cdot H \cdot H \cdot H \rightarrow \cdot\ddot{N}\cdot H$	$H:\ddot{N}:H$	$H-N-H$	
メタン (CH_4)	$\cdot\ddot{C}\cdot H \cdot H \cdot H \cdot H \rightarrow \cdot\ddot{C}\cdot H$	$H:\ddot{C}:H$	$H-C-H$	
二酸化炭素 (CO_2)	$\cdot\ddot{C}\cdot \ddot{O} \cdot \ddot{O} \cdot \rightarrow \ddot{O}::\ddot{C}::\ddot{O}$	$\ddot{O}::\ddot{C}::\ddot{O}$	$O=C=O$	
窒素 (N_2)	$\cdot\ddot{N}\cdot \ddot{N}\cdot \rightarrow \cdot\ddot{N}\cdot \ddot{N}\cdot$	$\ddot{N}::\ddot{N}::$	$N \equiv N$	
塩化水素 (HCl)	$H \cdot \ddot{Cl} \cdot \rightarrow H:\ddot{Cl}:$	$H:\ddot{Cl}:$	$H-Cl$	
塩素 (Cl_2)	$\cdot\ddot{Cl}\cdot \cdot\ddot{Cl}\cdot \rightarrow \cdot\ddot{Cl}\cdot \ddot{Cl}\cdot$	$\ddot{Cl}::\ddot{Cl}::$	$Cl-Cl$	

名称 (分子式)	共有結合ができる様子	電子式	構造式	分子模型
水素 (H_2)	$H \cdot \cdot H$	$(H:H)$	$H-H$	
水 (H_2O)	$\cdot\ddot{O}\cdot \cdot H$	$(\ddot{O}:H)$	$H-O-H$	
アンモニア (NH_3)	$H \cdot \cdot \ddot{N} \cdot \cdot H$	$(H:\ddot{N}:H)$	$H-N-H$	
メタン (CH_4)	$H \cdot \cdot \ddot{C} \cdot \cdot H$	$(H:\ddot{C}:H)$	$H-C-H$	
二酸化炭素 (CO_2)	$\cdot\ddot{O}\cdot \cdot \ddot{C} \cdot \cdot \ddot{O}\cdot$	$(\ddot{O}::\ddot{C}::\ddot{O})$	$O=C=O$	
窒素 (N_2)	$\cdot\ddot{N}\cdot \cdot \ddot{N}\cdot$	$(\ddot{N}::\ddot{N}::)$	$N \equiv N$	
塩化水素 (HCl)	$H \cdot \cdot \ddot{Cl} \cdot$	$(H:\ddot{Cl}::)$	$H-Cl$	
塩素 (Cl_2)	$\cdot\ddot{Cl}\cdot \cdot \ddot{Cl}\cdot$	$(\ddot{Cl}::\ddot{Cl}::)$	$Cl-Cl$	

(3) 授業評価シートによる評価

下の授業評価シートを作成し、生徒に自身の内容の理解度と授業に対する評価を行った。

■授業評価シート例

「分子模型で共有結合を理解する授業（実験・演習）」に関して、あてはまる数字に○をつけてください。

あなた自身の自己評価	できた	だいたい できた	少し できた	できな かった
1 共有結合について理解していましたか。(実験前)	4	3	2	1
2 共有結合について理解できましたか。(実験後)	4	3	2	1
授業に対する評価	そう思う	だいたい そう思う	あまりそう 思わない	そう思わ ない
1 板書は分かりやすかったですか。	4	3	2	1
2 説明は分かりやすかったですか。	4	3	2	1
3 分からないところが分かるようになる授業でしたか。	4	3	2	1
4 考える時間が十分にありましたか。	4	3	2	1

今回の授業に関して、あなたの感想や意見を書いてください。

よいと思ったところ	改善してほしいところや疑問に思ったことなど

授業評価シートの数値的評価の集計結果及び生徒の特徴的な感想や意見は次頁の通りである。分子模型を用いた活動によって、共有結合についての理解度が高まったと言える。また、生徒の授業内容に対する満足度も高いことがうかがえる。特に、「分からなかったことが分かるようになった」という評価は、教科担当教師の指導技術に起因する部分も大きい。が、班単位で議論しながら分子模型を組み立て、自発的に思考を展開させた結果でもある。生徒の自由記述からもそのことをうかがい知ることができる。

①授業評価シートの集計結果（1学年の2クラス計79名）

理解度	評価項目	理解できた	だいたい理解できた	少し理解できた	理解できなかった
	実験前の共有結合についての理解	5 (6.3%)	19 (24.1%)	28 (35.4%)	27 (34.2%)
実験後の共有結合についての理解	27 (34.2%)	46 (58.2%)	6 (7.6%)	0 (—)	
授業評価	評価項目	あてはまる	だいたいあてはまる	あまりあてはまらない	あてはまらない
	板書が分かりやすかったか	45 (57.0%)	33 (41.8%)	1 (1.3%)	0 (—)
	説明が分かりやすかったか	51 (64.6%)	27 (34.1%)	1 (1.3%)	0 (—)
	分かるようになる内容だったか	43 (54.4%)	35 (44.3%)	1 (1.3%)	0 (—)
考える時間が十分にあったか	31 (39.2%)	44 (55.7%)	4 (5.1%)	0 (—)	

②授業評価シートへの自由記述による評価

〈授業の良いところ〉

- ・分子模型を使ってモデルを作製することで共有結合の理解が深まった。(複数)
- ・図や模型を利用した説明で理解しやすかった。(複数)
- ・(教科担当教師の)表現力が豊かで分かりやすかった。
- ・班員と相談しながら、楽しく理解できた。
- ・自分で考えて進めることができるところがよかった。
- ・考える時間の時に、(教科担当教師が)個別に詳しく説明してくれてよかった。

〈改善してほしいところ〉

- ・考える時間をもう少し増やしてほしい。
- ・質問の時間を設定してほしい。
- ・共有電子対、非共有電子対などの説明を重点的に行ってほしい。
- ・ワークシートの電子式の欄が必要なかった。
- ・分子模型で好きな分子を組み立てたかった。

〈疑問に思ったこと〉

- ・二重結合や三重結合のように四重、五重・・・の結合もあるのかなと思った。

(4) まとめ

本実践を、「学習のねらいが達成されたか」という観点からまとめておく。

授業評価アンケートの結果からは、多くの生徒が「電子配置図や電子式をかいて共有結合の原理を考え、理解している」ことが確認できた。また、提出されたワークシートの記載状況から、「分子式、電子配置図、電子式、構造式を正しくかけている」ことも確認できた。さらに、分子模型で分子のモデルを作製する実験では、生徒の活動の様子とワークシートの記入状況や発問に対する受け答えの様子から、概ね「分子模型を適切に使用し、組み立てたモデルから、分子の特徴を探究している」ことも確認できた。

IV <指導事例(2)> 演習・実験「分子からなる物質の分子の形と物質の性質との関係を考えよう」

1 実施上の留意点

- (1) 演習を行う前に、演習に必要な分子間力に関する最小限の知識を理解させるために、**演習・実験プリント例(1)**の[確認]の中の発問に従って、モデル図を描きながら確認させる。
- (2) **演習・実験プリント例(1)**でモデル図を描かせるために、二酸化炭素、水、エタノール、シクロヘキサンの各分子のモデル図を、演習で使用する分子模型を考慮しながら、教科担当者がシンプルなモデル図を記入しておく。(**モデル図が入る** の表記箇所)
- (3) **演習・実験プリント例(2)**の分子模型スケッチ欄には、模型を組み立てさせる分子以外は予め記入しておく。分子模型は、棒球モデルでも空間充填モデルでもよい。
- (4) 無極性分子の分子量と沸点・融点の関係は、実際は一次関数の関係にはなっていないが、分子量と沸点・融点の相関関係を表すために直線を引いたことを、後で解説する。
- (5) [仮説2]の検証で、エタノールと水の混合、シクロヘキサンと水の混合を演示し、実際に観察させてから考察を進めさせる。効果的な演示をするために、CCDカメラとプロジェクターを用いてスクリーンに投影する。その際、混合液の界面の有無が確認できるように、ガラス器具の背景を工夫する。
- (6) モデル図を黒板で示すときには、発泡スチロール球で作製した分子模型にマグネットを付けたものなどを使用して解説すると理解させやすい。(写真9及び写真10参照)

■演習・実験プリント例(1)

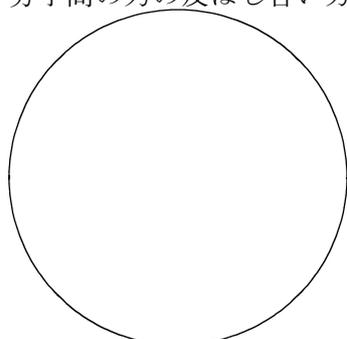
演習・実験 分子からなる物質の分子の形と物質の性質との関係を考えよう

[目的]

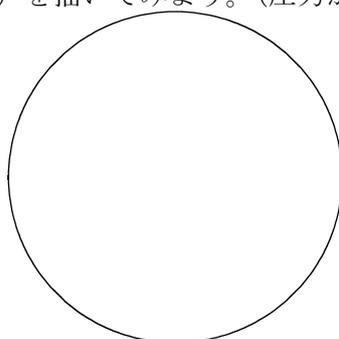
- (1) 色々な分子からなる物質について、分子の形を分子模型を使って確認し、極性分子と無極性分子に分類する。
- (2) 極性分子と無極性分子それぞれについて、分子量と融点及び沸点との関係を調べ、分子間の相互作用(引力の及ぼし方)を考える。
- (3) 極性分子同士の間、無極性分子同士の間、極性分子と無極性分子との間の相互作用について、それぞれ考える。

[確認]

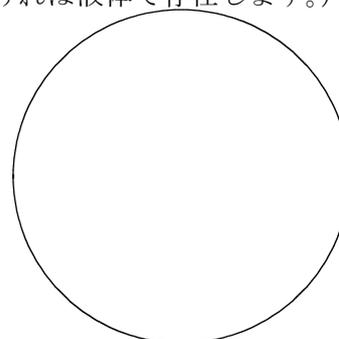
分子からなる物質が、固体、液体、気体で存在するときのようすを、イメージしてみよう！
例として、二酸化炭素分子(**モデル図が入る**)がそれぞれの状態にあるときのようす(分子の配列や分子間の力の及ぼし合い方など)を描いてみよう。(圧力が高ければ液体で存在します。)



固体(面心立方格子)



液体



気体

- (1) 分子間の相互作用（引力）が大きいほど、固体から液体へ融解したり、液体から気体へ蒸発（沸騰）したりするためのエネルギーが_____必要となることが予想できる。
- (2) どんな分子でも分子同士の間には弱い引力（ファンデルワールス力）が働き、分子の質量が大きいほどファンデルワールス力が_____ことが分かっている。
- (3) ファンデルワールス力の大きさは、静電気を帯びた粒子同士の間働く_____力（クーロン力）に比べると、ずっと小さいことが分かっている。

※ 確認事項をもとに、次の仮説を立てて、探究に入ろう！

[仮説1]

分子からなる物質の沸点と融点は、分子間に働くファンデルワールス力と正の相関関係にある分子量が_____いほど高い。

[準備]

器具類：分子模型、定規

[方法]

○分子の形の確認

- (1) 別紙の、関係分子の性質等が記載された表の「物質名」の欄に物質名を記入する。
- (2) エタノール分子とシクロヘキサン分子について模型を組み立て、表の「分子模型のスケッチ」の欄にスケッチ図を記入する。
(その他の分子は、既に確認しているので、分子の概形が分かるように表に記入する。)
- (3) 分子の形が上下・左右・前後で対称であるかどうかを確認し、表の「対称性」の欄に記入する。上下・左右・前後で対称であれば○を、対称でなければ×を記入する。
- (4) 「対称性」の有無と分子を構成する原子対の電気陰性度の差をもとに、分子の極性の有無を考え、表の「極性」の欄に記入する。極性がある（極性分子である）場合には○を、極性が無い（無極性分子である）場合には×を記入する。

○分子の形（極性・無極性）の融点・沸点への影響についての検討

- (1) グラフ用紙に、(分子量, 融点) をプロットする。このとき、極性分子と無極性分子を区別できるようにプロットする（色や形で）。
- (2) 同様に、グラフ用紙に、(分子量, 沸点) をプロットする。
- (3) プロットした結果、分子量と沸点または融点との間に相関が見られ、一方が増加するのに伴って他方も増加している関係（正の相関関係）の場合は、直線を描いてみる。
* 1次関数 ($y = ax + b$) の関係に近似してみる。
- (4) 融点・沸点の高さに影響している分子間の引力の種類を検討する。

○分子同士の相互作用についての検討

- (1) 極性分子である水分子について、固体、液体のときの水分子同士の間に働く力を考えながら、モデル図を描く。
- (2) 表「分子からなる物質の、分子の形と物質の性質の関係」の「水への溶解性」を参考にして、極性分子と無極性分子のうち、水に溶けやすい傾向にあるのはどちらかを検討する。
- (3) 水にエタノールを加えたときと、水にシクロヘキサンを加えたときのようにそれぞれ観察する。《演示実験》
- (4) 水に溶けやすい分子が水に溶けているときのように、溶けている分子と水分子の間、及び水分子同士の間に働く力を考えながらモデル図を描く。
- (5) 水に溶けにくい分子を水に加えたときのように、溶けていない分子同士の間、及び水分子同士の間に働く力を考えながら、モデル図を描く。
- (6) 分子量と沸点・融点との関係と水への溶解性を再度整理しながら、極性分子だけが存在する場合、無極性分子だけが存在する場合、それぞれについて、分子間に主にどんな力が働いているかを整理する。

○その他

時間があれば、それぞれの物質の性質を教科書や図説で調べ、主なものについて別紙の表に記入する。

[結果と考察]

○分子の形の確認

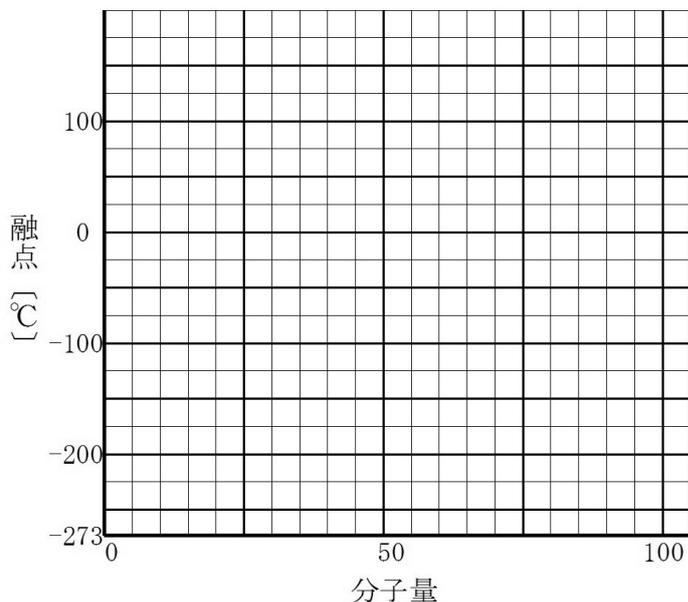
別紙の表「分子からなる物質の、分子の形と物質の性質の関係」のとおり。

※表をまとめる過程で、気付いたことがあれば、記述しよう！

※実際の記入欄はもっと広くとる。

○分子の形（極性・無極性）の融点・沸点への影響についての検討

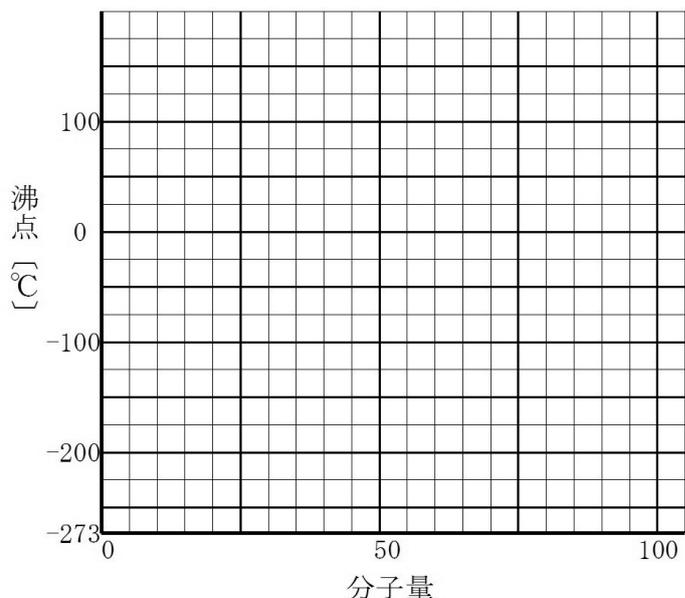
- (1) 分子量と融点との関係を表したグラフより分かること



グラフより、

よって、融点の高さにファンデルワールス力だけが影響していると考えられるのは、

(2) 分子量と沸点との関係を表したグラフより分かること



グラフより、

よって、沸点の高さにファンデルワールス力だけが影響していると考えられるのは、

(3) 分子量と融点との関係を表したグラフおよび分子量と沸点の関係を表したグラフより分かることをまとめよう！

同じくらいの分子量の極性分子と無極性分子を比較すると、

であるので、

_____分子では、分子間にファンデルワールス力以外の力が働く可能性が高い。

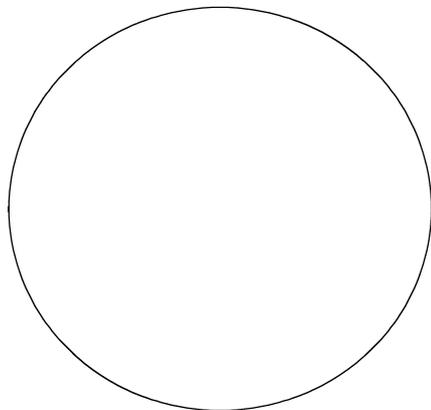
※ これまでの結果と考察をもとに、次の仮説を立てて、探究を続けよう！

[仮説2]

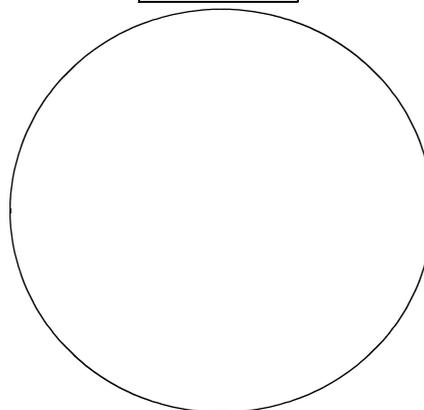
極性分子と極性分子の間には、ファンデルワールス力よりも引力の大きさが_____い、何らかの力が働く。

○分子同士の相互作用についての検討

(1) 固体の水(氷)及び液体の水について、水分子のようすを、分子間にどのような力が働いているかを考えながら、モデル図で表そう！(6個の水分子(モデル図が入る))で表現しよう！)



固体



液体

(2) 別紙の表の「水への溶解性」を参考にして、極性分子と無極性分子のうち、水に溶けや

すい傾向にあるのはどちらかを判断してみよう！

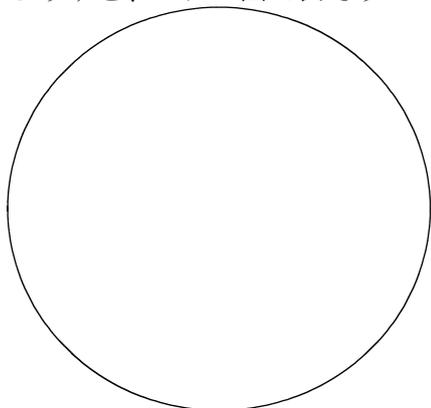
水に溶けやすい傾向があるのは、

- (3) 水にエタノールを加えたとき、水にシクロヘキサンを加えたときの様子を観察し、観察結果を記録しよう！

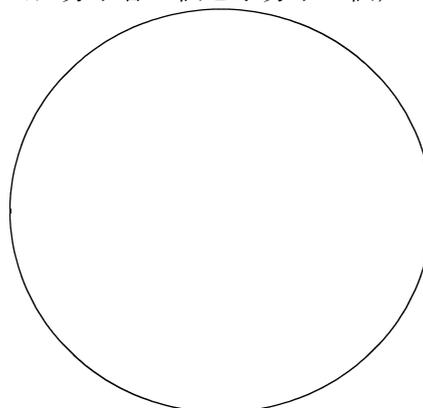
水にエタノールを加えたときは、

一方、水にシクロヘキサンを加えたときは、

- (4) エタノール分子が水に溶けているときの様子、及びシクロヘキサン分子を水に加えたときの様子を、モデル図で表そう！（エタノール・シクロヘキサン分子各3個と水分子6個）



水とエタノール



水とシクロヘキサン

* シンプルに表すために、エタノールとシクロヘキサンのモデルは、次のものを使う。

エタノール：

シクロヘキサン：

- (5) (1)～(4)をもとに、極性分子同士の間働く力についてまとめよう！

極性分子同士の間には、_____力がはたらいており、その力はファンデルワールスカよりも、

したがって、極性分子である水分子に他の極性分子を加えると、

一方、水分子に無極性分子を加えると、水分子同士の引力が、_____よりも大きいので、

- (6) ヘキサンのような無極性分子にメタンのような別の無極性分子を混合させたときに、均一に混ざり合う（溶解する）かどうかを予想してみよう！（原理や理由も考えよう！）

※実際の記入欄はもっと広くとる。

■ 演習・実験プリント例 (2)

分子からなる物質の、分子の形と物質の性質の関係 (No.1)

	分子式	物質名	分子の形			電気陰性度の差 <small>電子を引き寄せる力の大きさの違い</small>	極性	分子量	融点	沸点	水への溶解性	メモ(その他の性質)
			分子模型スケッチ	形の名称	対称性							
単原子分子	He	ヘリウム	●	/	○	/	×	4	-272	-269	×	
	Ne		●	/	/	/		20	-249	-246	×	
	Ar		●	/	/	/		40	-189	-186	×	
二原子分子	H ₂	水素		直線形	○	H⇌H : 2.2-2.2=0		2	-259	-253	×	
	N ₂			直線形	/	N⇌N :		28	-210	-196	×	
	O ₂			直線形	/	O⇌O :		32	-218	-183	×	
	F ₂			直線形	/	F⇌F :		38	-220	-189	○(反応)	
	Cl ₂			直線形	/	Cl⇌Cl :		71	-101	-34	○(反応)	
	HF			直線形	×	H⇌F :		20	-83	19.5	○(少し反応)	
	HCl			直線形	/	H⇌Cl :		36.5	-114	-84.9	○(反応)	
	HBr			直線形	/	H⇌Br :		81	-88.5	-67	○(反応)	
CO			直線形	/	C⇌O : 2.6-3.4=-1.2		28	-205	-192	×		

〈表面〉

分子からなる物質の、分子の形と物質の性質の関係 (No.2)

	分子式	物質名	分子の形			電気陰性度の差 <small>電子を引き寄せる力の大きさの違い</small>	極性	分子量	融点	沸点	水への溶解性	メモ(その他の性質)
			分子模型スケッチ	形の名称	対称性							
三原子分子	H ₂ O	水				H⇌O :	○	18	0	100	/	
	H ₂ S			折れ線形 (V字形)	/	H⇌S :		34	-85.5	-60.7	○(少し反応)	
	CO ₂					C⇌O :		44	-78.5昇華		△(少し反応)	
多原子分子	NH ₃					H⇌N :		17	-77.7	-33.4	○(少し反応)	
	CH ₄				○	H⇌C :	○	16	-183	-162	×	
	C ₂ H ₄	エチレン (エテン)		平面 ・対称性	○	H⇌C : C⇌C :	×	28	-169	-104	×	
	C ₂ H ₂	アセチレン (エチン)		直線形	○	H⇌C : C⇌C :		26	-81.8		×	
	C ₆ H ₁₂	シクロ ヘキサン		/	○	H⇌C : C⇌C :	×	84	6.5	80.7		
C ₂ H ₆ O	エタノール		/	×	H⇌C : C⇌O : C⇌C :		46	-115	78.3	○		

*「反応」には電離も含む。

*「分子量」とは、分子の平均的な質量の大きさを相対的に表した数値である。(「質量数12の炭素原子の質量」=12を基準にしている。)

〈裏面〉

本調査研究における実践では、B4判の用紙に両面印刷して配布した。

2 実践後の振り返り

(1) 演習の様子

本調査研究では、分子の極性や分子間力を学習していない1学年の生徒と、既に学習している3学年の生徒のそれぞれに演習・実験に取り組ませた。1学年では、電気陰性度を用いず、分子の形の対称性だけに着目させ、演習の中で極性分子と無極性分子を確認しながら、作業を進めさせた。(前頁の演習・実験プリント例(2)の表の項目も多少変えて使用した。)

当初1単位時間(50分)での演習及び演示実験を想定していたが、1学年のクラスではグラフを描き、極性分子無極性分子の分子間力の特徴を確認するところまでで50分が経過してしまった。演習・実験に要する時間を拡充するとともに、生徒の実



写真7 表への記入



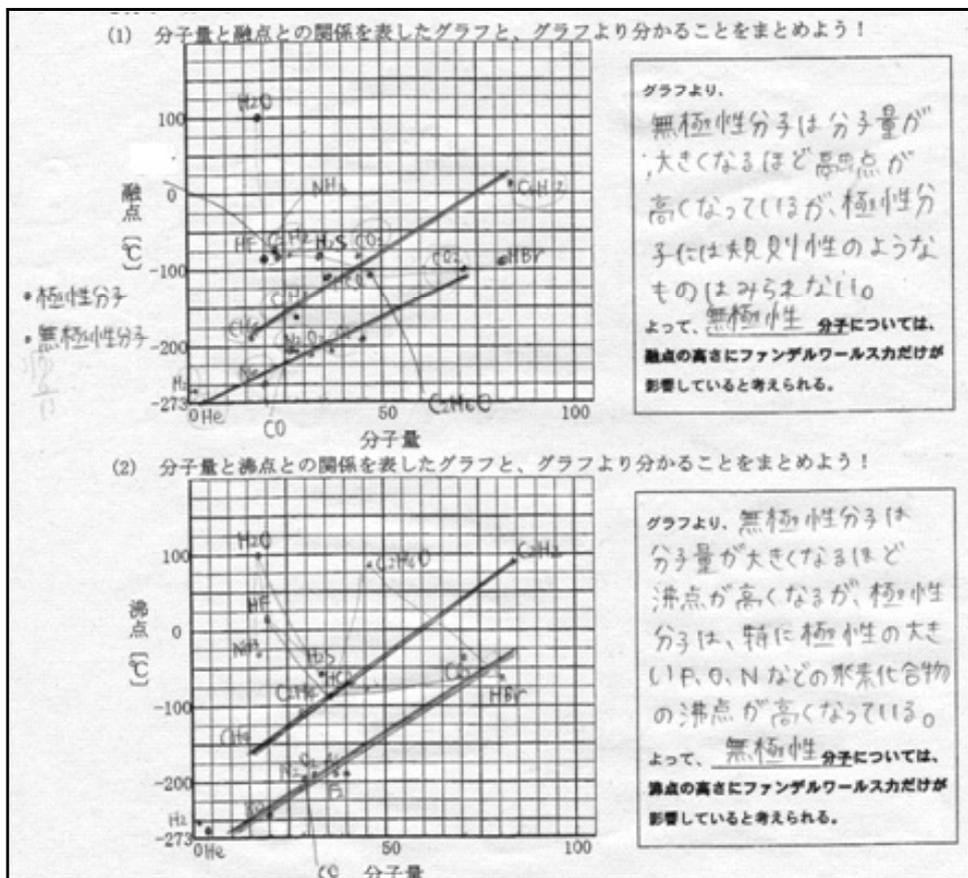
写真8 グラフの作成

情に応じて演習・実験プリント例(1)の「確認」の内容を簡素化したり、組み立てる分子模型の数を減らしたりして、時間の調整を図る必要があることが確認できた。

(2) 生徒が記入した演習・実験プリント

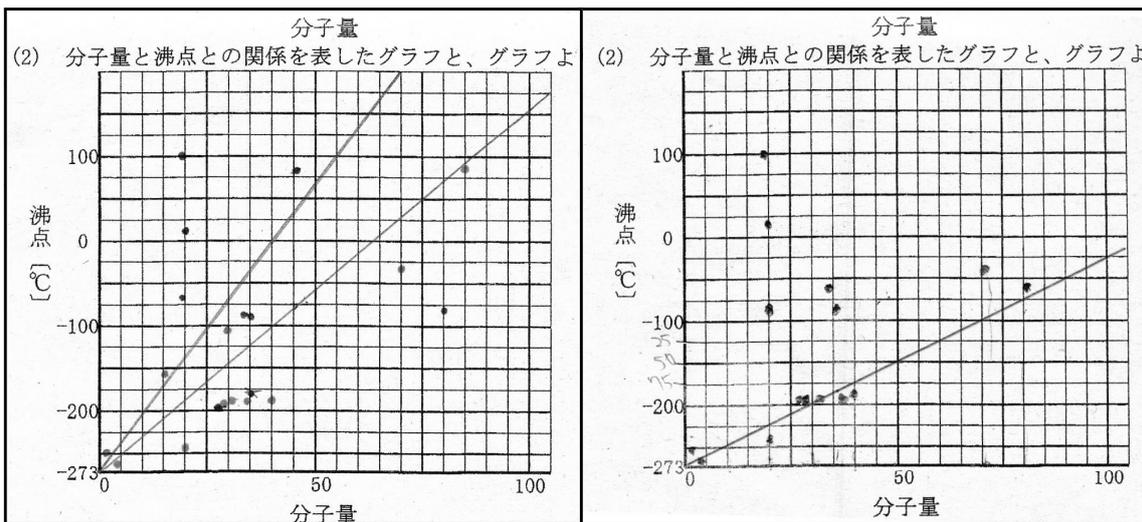
生徒がまとめた演習・実験プリントの一部を、分子量と沸点及び融点の関係を表したグラフ、分子間の相互作用を表現したモデル図などに分けて紹介する。

■生徒が記入した演習・実験プリント(1)のグラフ



3学年の生徒が描いたグラフであり、無極性分子については、無機物質と炭化水素に分けて相関関係を示す直線を引いている。また、極性分子についても、同族の水素化合物ごとにグループ分けをして考察している。「グラフより分かること」も、発展的な知識を活用して適切な記述がなされている。

ただし、科目「化学基礎」においては、ここまでの記述は期待できない。



1 学年の二人の生徒が描いた、分子量と沸点の関係を表したグラフである。左のグラフを描いた生徒は、無極性分子について適切な直線を引いているが、分子量と沸点の相関が確認できないはずの極性分子についても直線を引いてしまっている。一方、右のグラフを描いた生徒は、無極性分子のみ直線を引いているものの、一部のデータをプロットしていないために、直線の傾きが小さくなっている。科目「化学基礎」においても、この二人の生徒が描いたグラフと同様のグラフを描く生徒は少なくないと予想できる。また、この二人の生徒も含め、想定していたよりもプロットする作業に時間がかかっていた。1 単位時間の授業においては、クラスの生徒を半数にグループ分けして、沸点または融点のいずれかのグラフを分担して描かせ、それぞれが描いたグラフを実物投影装置等を用いて投影し、一時的に情報を共有するのがよいものと思われる。

■生徒が記入した演習・実験プリント（2）

分子からなる物質の、分子の形と物質の性質の関係											
分子式	物質名	分子の形			電気陰性度の差 電子を引き寄せむきの大ききの違い	極性	分子量	融点	沸点	水への溶解性	メモ(その他の性質)
		分子模型スケッチ	形の名称	対称性							
H ₂ O	水		折れ線形	○	H⇌O : 2.1-3.5=-1.4	○	18	0	100	無色・無臭・無味の液体。水素結合による沸点が高く、また溶解力(固体の密度の低い)の表面張力がある。	
H ₂ S	硫化水素		折れ線形(V字形)	○	H⇌S : 2.1-2.5=-0.4	○	34	-85.5	-60.7	○(少し反応)	無色・無臭の液体。沸点、融点、溶解性が低い。水に比べて溶解性も低い。二硫化炭素を生成する。
CO ₂	二酸化炭素		直線形	○	C⇌O : 2.6-3.5=-1.1	×	44	-78.5	昇華	△(少し反応)	無色・無臭の気体。分子量が0.01%を超える。液体を沸かし、気体と二酸化炭素を生成する。二酸化炭素を生成する(CO ₂)。
NH ₃	アモニア		三角錐形	○	H⇌N : 2.1-3.0=-0.9	○	17	-77.7	-33.4	○(少し反応)	無色・無臭の液体。水に溶解。沸点、融点、溶解性が低い。水に溶解してアンモニア水となる。冷たい水に溶けると白煙を発生する。
CH ₄	メタン		正四面体形	○	H⇌C : 2.1-3.5=-1.4	×	16	-183	-162	×	無色の気体。水に溶解。沸点、融点、溶解性が低い。二酸化炭素と類似した性質を持つ。明確な溶解性、気体の性質を示す。
C ₂ H ₄	エチレン(エテン)		平面・対称性	○	H⇌C : 2.1-3.5=-1.4 C⇌C : 3.5-3.5=0	×	28	-169	-104	×	無色・無臭の気体。溶解性、沸点、融点、溶解性が低い。二酸化炭素と類似した性質を持つ。明確な溶解性、気体の性質を示す。
C ₂ H ₂	アセチレン(エチン)		直線形	○	H⇌C : 2.1-3.5=-1.4 C⇌C : 3.5-3.5=0	×	26	-81.8	×	無色・無臭の気体。溶解性、沸点、融点、溶解性が低い。二酸化炭素と類似した性質を持つ。明確な溶解性、気体の性質を示す。	
C ₆ H ₁₂	シクロヘキサン			○	H⇌C : 2.1-3.5=-1.4 C⇌C : 3.5-3.5=0	×	84	6.5	80.7	×	無色の液体。沸点、融点、溶解性が低い。二酸化炭素と類似した性質を持つ。明確な溶解性、気体の性質を示す。
C ₂ H ₆ O	エタノール			×	H⇌C : 2.1-3.5=-1.4 C⇌O : 3.5-2.6=0.9 C⇌C : 3.5-3.5=0	○	46	-115	78.3	○	無色・無臭の液体。沸点、融点、溶解性が低い。二酸化炭素と類似した性質を持つ。明確な溶解性、気体の性質を示す。

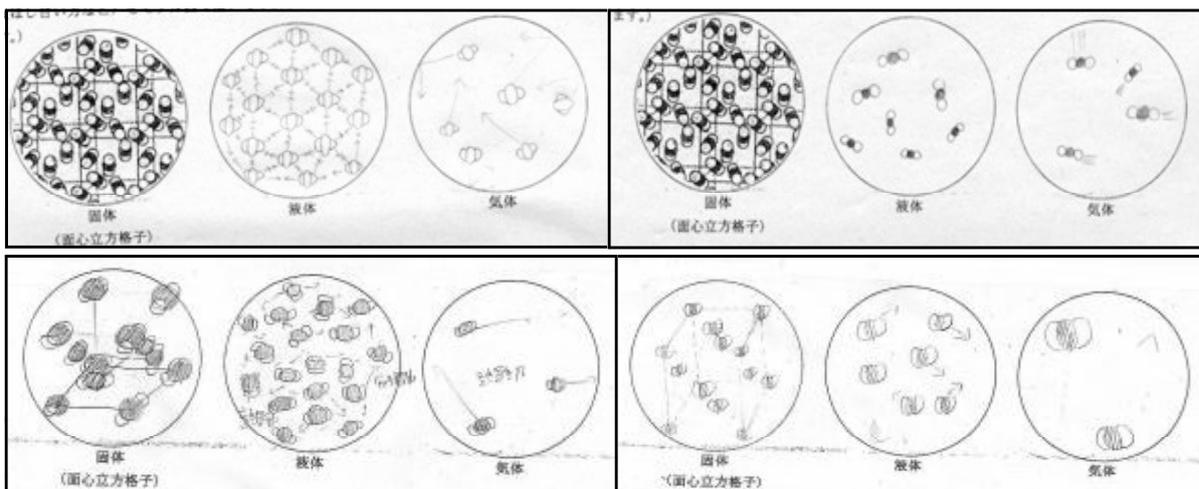
*「分子量」とは、分子の平均的な質量の大きさを相対的に表した数値である。(「質量数12の炭素原子の質量」=12を基準にしている。)

*「反応」には電離も含む。

3 学年の生徒がまとめた表である。分子模型スケッチ図のほとんどは、教科担当教師が予め記入して印刷されたものであり、本実践では、生徒は、硫化水素分子のみ分子模型で確認して図を描いている。この生徒は、物質の性質を図説で調べ、かなり詳細な説明を記入している。

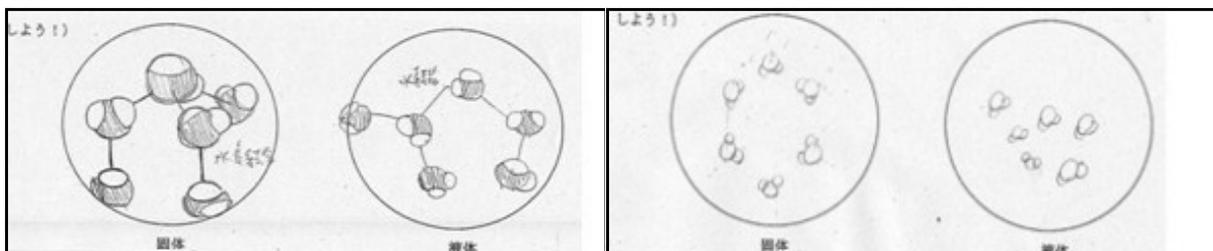
■生徒が記入した演習・実験プリント（1）のモデル図

(A) 二酸化炭素の三態のモデル図



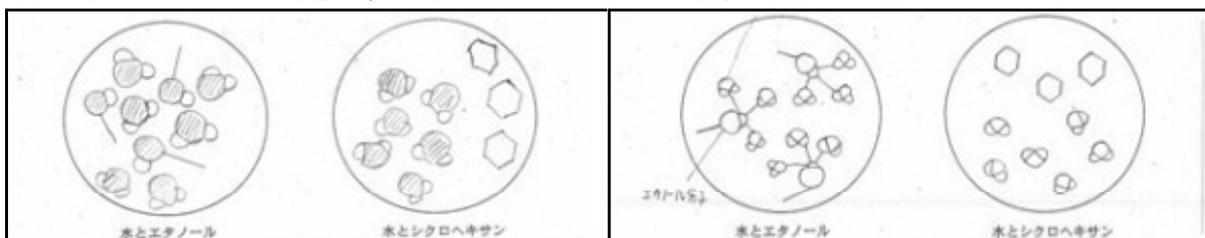
上段が1学年の二人、下段が3学年の二人の生徒がそれぞれ描いたモデル図である。1学年での実践では、面心立方格子について未学習であることに加えて演習の時間を十分に確保できなかったため、固体のモデル図については、教科担当教師が予め記入して印刷されている図になっている。三態のモデル図の描き方に関しては1学年の生徒と3学年の生徒で大きな差異は見られなかった。新学習指導要領の下では、中学校の理科で同様の図を用いて三態を学習してくるので、この教材で扱うことに無理はないものと判断できる。

(B) 水の固体と液体のモデル図



いずれも、3学年の二人の生徒がそれぞれ描いたモデル図である。既に学習している水素結合を意識した図になっている。科目「化学基礎」におけるこの演習においては、水素結合や固体のときの水分子の規則正しい配列まで意識して描かせるのではなく、あくまでも水素原子と酸素原子にそれぞれ帯びた静電気による相互作用に気付かせながら図を描かせたい。

(C) 水とエタノールの混合物、水とシクロヘキサンの混合物のモデル図



いずれも、3学年の二人の生徒がそれぞれ描いたモデル図であり、いずれも適切に描かれている。演示実験を観察し、シクロヘキサンと水が分離していることを確認しているので、1学年の生徒でもシクロヘキサンの図は適切に表現できることが期待できる。エタノール分子の静電気の分布を的確にとらえ、水分子とどのように相互作用するかを考えるのはやや難しいかもしれない。

次頁の写真9及び写真10は、(A)、(B)、(C)のモデル図の記入例を説明するために板書した図

の一部である。教科担当教師が、発泡スチロール球とマグネットを材料にして事前に作製した二酸化炭素分子や水分子等の分子モデルを活用してモデル図を板書しており、大変見やすく、理解しやすい図になっている。また、この分子モデルは黒板上を自由に移動させられるので、分子の熱運動を説明しやすいのも特長の一つである。



写真9 無極性分子と極性分子について、モデル図での三態の説明

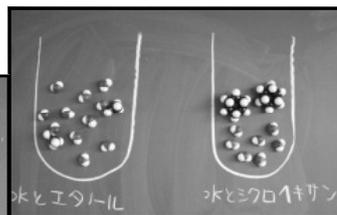


写真10 水と混合させたときのモデル図での説明

(3) 生徒が記入した「演習・実験を通して気付いたこと」や「感想・反省」

3学年の生徒が演習・実験を終えて記述した感想・反省から特徴的なものを紹介する。今回の実践では、生徒による授業評価や学習の振り返りができなかったため、これらの記述を教材に対する評価を行う際に参考にした。

〈学習目標及び教材のねらいが概ね達成できたと判断できる記述〉

- ・ファンデルワールス力と水素結合などの静電気による引力を分子間力として学んで、それほど大差ないように感じていたが、今回改めて考察してみてその違いを実感し、今後一層深く化学を学んでいくにはその差異を厳密に理解する必要があると痛感した。
- ・極性分子と無極性分子の水への溶解性の特徴を確認できたが、無極性分子においても CO_2 や Cl_2 、 F_2 などの例外もみられたのでその理由も調べてみたい。
- ・極性分子のほうが無極性分子よりも沸点や融点が高く、極性分子間のみにはたらく引力によるものだと分かったが、グラフを見ると、あまりきれいな関係ではないように思えたので、より深く様々な見方で考察してみたいと思った。
- ・極性分子と無極性分子の間には、思っていたよりも様々な違いがあったことに気付いた。今後は、分子の極性の有無にもう少し気を付けて学習していきたいと思う。
- ・分子量と極性と沸点・融点の関係について、実際にグラフを描いて確認できてよかった。
- ・今回調べたそれぞれの物質に関して、他の性質（比熱など）にも興味をもった。

〈学習目標及び教材のねらいが達成できなかったと判断できる記述〉

- ・融点、沸点のグラフから、分子の規則性を見つけ出すのが難しかった。
- ・内容が難しく、何をやってるかがあまり分からなかった。

(4) まとめ

演習・実験レポートの状況及び演習中の生徒の様子から、学年を問わず大多数の生徒が「分子の形の特徴を的確にとらえ、分子の極性の有無を判断」できていると評価している。一方「グラフやモデル図を描き、極性・無極性分子の性質の違いを探究し、導き出した考えをレポートにまとめる」ことについては、電気陰性度や分子の極性を学習していない生徒にとっては、ややハードルが高い課題が多く、目標到達度は決して高くはなかった。中には内容を理解できずに授業についていけなかった生徒も見られた。したがって、この演習・実験においては、80分程度の時間を確保し、教科担当者の説明・指示と作業を交互に繰り返しながら演習を進めていく必要があると判断した。一方で、前時までに分子模型を扱いモデル図を描いているので、分子間の相互作用をモデル図で表現することは十分に可能であると感じた。また、科目「化学基礎」において沸点と融点で極性分子と無極性分子の特徴を考察させることについても問題点は見いだせなかった。

V 参考 生徒実験「炭素の同素体の模型を作ろう」

1 ねらい

- (1) 図1に示す幾何学的な特性を利用し、紙で結晶や分子の骨格を表したダイヤモンド、黒鉛、 C_{60} の模型を作製させ、炭素原子間の共有結合や原子配列の違い、及び分子と共有結合の結晶（巨大分子）の違いを確認させる。
- (2) 正三角形の格子が描かれた同じ台紙から折り曲げ方等の違いにより異なる三つの物質が表現できることを確認させ、分子や結晶の幾何学的な美しさや自然科学の奥深さを体感させる。

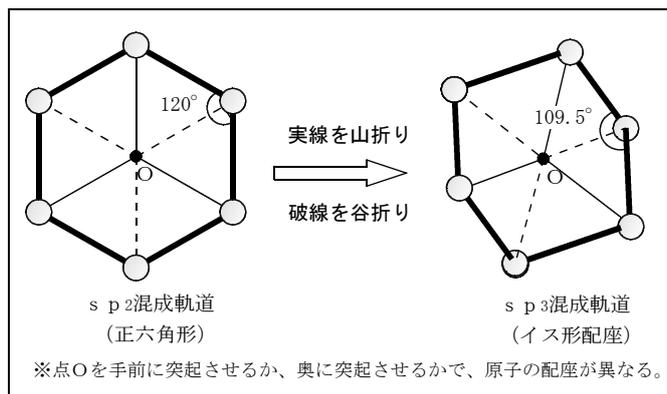


図1 平面正六角形(黒鉛の原子配列)を、中心Oと各頂点の線で折り曲げるにより、シクロヘキサン・イス型配座の形(ダイヤモンドの原子配列)に変化する様子

2 作製方法

(1) 準備

①材料 (1 班分)

ケント紙 (白色、A4判) 3枚、ラベルシール (A4判、カットしていないもの) 1枚、発泡スチロール球 (直径1cm) 206個、モール (黒) (直径4mm、長さ17mm×24以上)、モール (白) (直径4mm、長さ40mm×22以上)

*ケント紙にはダイヤモンド、黒鉛、 C_{60} の原子間の共有結合 (模型骨格または展開図) (p. 52、p. 54、p. 55) を、ラベルシールにはダイヤモンドの原子間の共有結合 (模型骨格) 及び C_{60} の模型を組み立てるために使用する接合シール (p. 53) を印刷しておく。

*上記に示すそれぞれのモールの長さは、等倍で印刷したとき (炭素間距離17mmのとき) のものであり、拡大率に合わせて長さを決定する。

②工具類

はさみ、ニッパー、カッターナイフ、ピンセット、爪楊枝、発泡スチロール用接着剤、ものさし、顔料マーカー (黒) (水性)、発泡スチロールカッター

*発泡スチロールカッターが無い場合はカッターナイフで代用できるが、作業効率が悪くなる。(電池式の発泡スチロール用カッター (¥105) を使用してみたが、この実験においては十分に役割を果たした。)

(2) 作製手順

※炭素原子の位置を表す球、共有結合を表す棒、分子間力を表す棒

①発泡スチロール球をピンセット等で固定し、発泡スチロールカッターで、球の赤道面に沿って球の中心部より少し奥まで切り込みを入れる。

②発泡スチロール球を爪楊枝等で固定し、球の表面をマーカー (黒) で着色する。

*①と②は、授業外の活動で行う。

③ニッパーを使って、モール (黒色) を17mmの長さに切っていく。(24本用意する。)

*はさみを使用して切ってもよいが、ニッパーで切った方が、モールの末端が鋭利になり、発泡スチロール球に刺しやすくなる。

④ニッパーを使って、モール（白色）を40mmの長さに切っていく。（22本用意する。）

【ダイヤモンドの結晶模型】

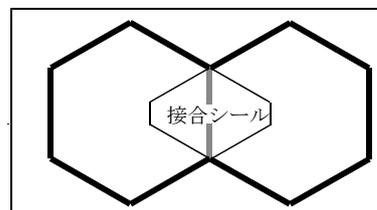
- ①ケント紙に印刷された模型骨格（表面）とラベルシールに印刷された模型骨格（表面）をそれぞれ周囲の太実線に沿って切り抜く。
- ②ラベルシールの模型骨格上段、中段、下段を、それぞれケント紙の上段、中段、下段の裏面に頂点（原子）の番号が合うように貼り合わせる。
- ③上段、中段、下段それぞれの表面と裏面ともに、折り曲げやすくするために、細実線上にカッターナイフでキズを付けた上で、細実線を山折りにする。
 - *表面、裏面ともに③の操作を行えば、細破線部は自然と谷折りになる。
 - *中心に★印が描かれた六角形は★が山になるように、中心に☆印が描かれた六角形は☆が谷になるように折り曲げる。
- ④各頂点に接着剤を塗り、事前に準備した発泡スチロール球を差し込む。
 - *頂点と発泡スチロール球の中心が一致するように調整する。
- ⑤上段（裏面）の突起した頂点上の球と中段（表面）の突起した頂点上の球をモール（黒）で接続する。
 - *モールは球の中心（骨格の頂点）まで差し込む。
 - *番号2の頂点上の球と番号26の頂点上の球、番号4の頂点上の球と番号28の頂点上の球、
・ ・ ・ というように接続する。接続した球と接続していない球が一つおきに存在することになる。
- ⑥中段（裏面）の突起した頂点上の球と下段（表面）の突起した頂点上の球をモール（黒）で、⑤と同様に接続する。
 - *番号25の頂点上の球と番号49の頂点上の球、番号27の頂点上の球と番号51の頂点上の球、
・ ・ ・ というように接続する。中段については、⑤で接続しなかった球が下段の球と接続されることになる。

【黒鉛の結晶模型】

- ①ケント紙に印刷された模型骨格を周囲の太実線に沿って切り抜く。
- ②切り抜いた骨格の裏面に、マーカーで表面と同じ太実線（結合を表す線）を引く。
 - *ダイヤモンドと同様に、黒鉛の台紙をラベルシールにも印刷し、切り抜いたものを裏面に貼り付ければ、線を引く必要がない。
- ③各頂点に接着剤を塗り、事前に準備した発泡スチロール球を差し込む。
 - *頂点と発泡スチロール球の中心が一致するように調整する。
- ④上段（裏面）の番号1の頂点上の球と中段（表面）の番号26の頂点上の球、上段の番号3の頂点上の球と中段の番号28の頂点上の球、
・ ・ ・ というように、モール（白）で接続する。
 - *モールは球の中心（骨格の頂点）まで差し込む。
 - *接続した球と接続していない球が一つおきに存在することになる。
 - *モール（白）は、分子間に働く引力と同様の力であり、共有結合を表すものではない。
- ⑤中段（裏面）の番号29の頂点上の球と下段（表面）の番号52の頂点上の球、中段の番号27の頂点上の球と下段の番号68の頂点上の球、
・ ・ ・ というように、モール（白）で接続する。
 - *④で接続しなかった球が下段の球と接続されることになる。

【C₆₀の分子模型】

- ①ダイヤモンド（裏面）用のラベルシール上にある「C₆₀組み立て用接合シール」を実線に沿って切り取る。12枚の接合シールが必要になる。
- ②ケント紙に印刷された模型骨格を周囲の太実線に沿って切り抜く。また、二重線（矢印で指し示す部分）に沿って切る。
- ③折り曲げやすくするために、正六角形と六角形の間の実線の上にカッターナイフでキズを付けた上で、実線を山折りにする。
- ④同じ数字（四角囲みの数字）の頂点同士が一致するように、図2のように、裏面に接合シールを使って、貼り合わせていく。
- ⑤各頂点に接着剤を塗り、事前に準備した発泡スチロール球を差し込む。



*頂点と発泡スチロール球の中心が一致するように調整する。 図2 接合シールの貼り方

(3) 完成した各同素体の模型

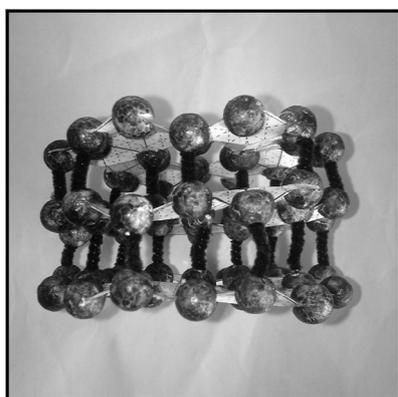


写真11 ダイヤモンドの模型

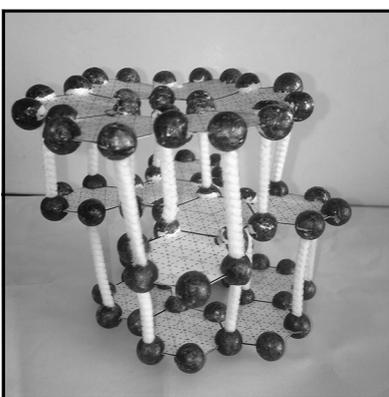


写真12 黒鉛の模型

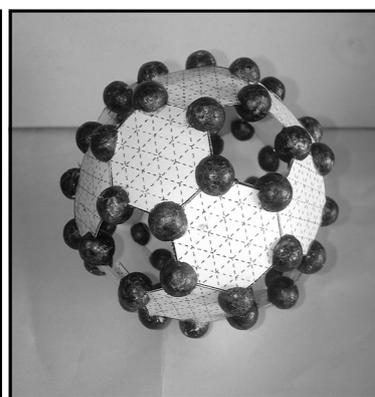


写真13 C₆₀の模型

3 実験結果のまとめ及び考察をさせるための発問（例）

- (1) それぞれの物質について、一つの炭素原子はいくつの炭素原子と共有結合しているだろうか。
 - ①ダイヤモンド（中段の中心部の炭素で確認する。）

*各段の末端部が、中段の中心部の数と異なっているとすれば、どうして異なるのかを考えよう。（そもそも本当に末端なのだろうか？）
 - ②黒鉛（中心部の炭素で確認する。）

*各段の末端部が、中心部の数と異なっているとすれば、どうして異なるのかを考えよう。（そもそも本当に末端なのだろうか？）
 - ③C₆₀（どの炭素で確認してもよい。）
- (2) ダイヤモンドに対して、黒鉛とC₆₀が異なっている点を考えよう。
- (3) それぞれの物質は、いくつの炭素原子できているだろうか。（数を定めることができない場合は、「数が定まらない」や「多数」などと表現してもよい。）
- (4) C₆₀に対して、ダイヤモンドと黒鉛が異なっている点を考えよう。

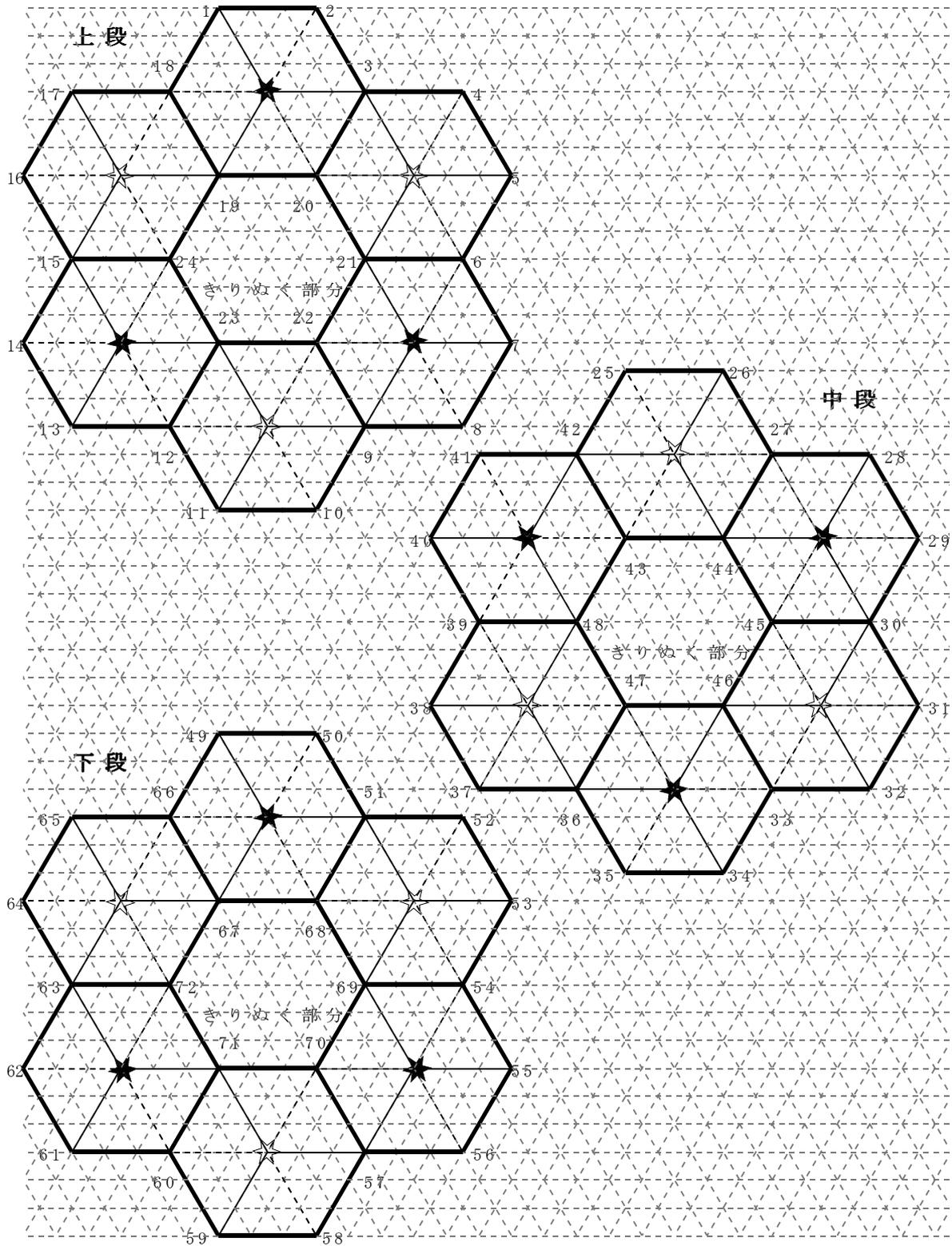
4 各同素体の模型骨格及び展開図

ダイヤモンド、黒鉛、C₆₀の骨格及び展開図を次頁以降に示す。各頂点が炭素原子の位置を表し、各太実線が炭素間の共有結合を表す。また、各頂点に付してある数字は、原子を識別するため

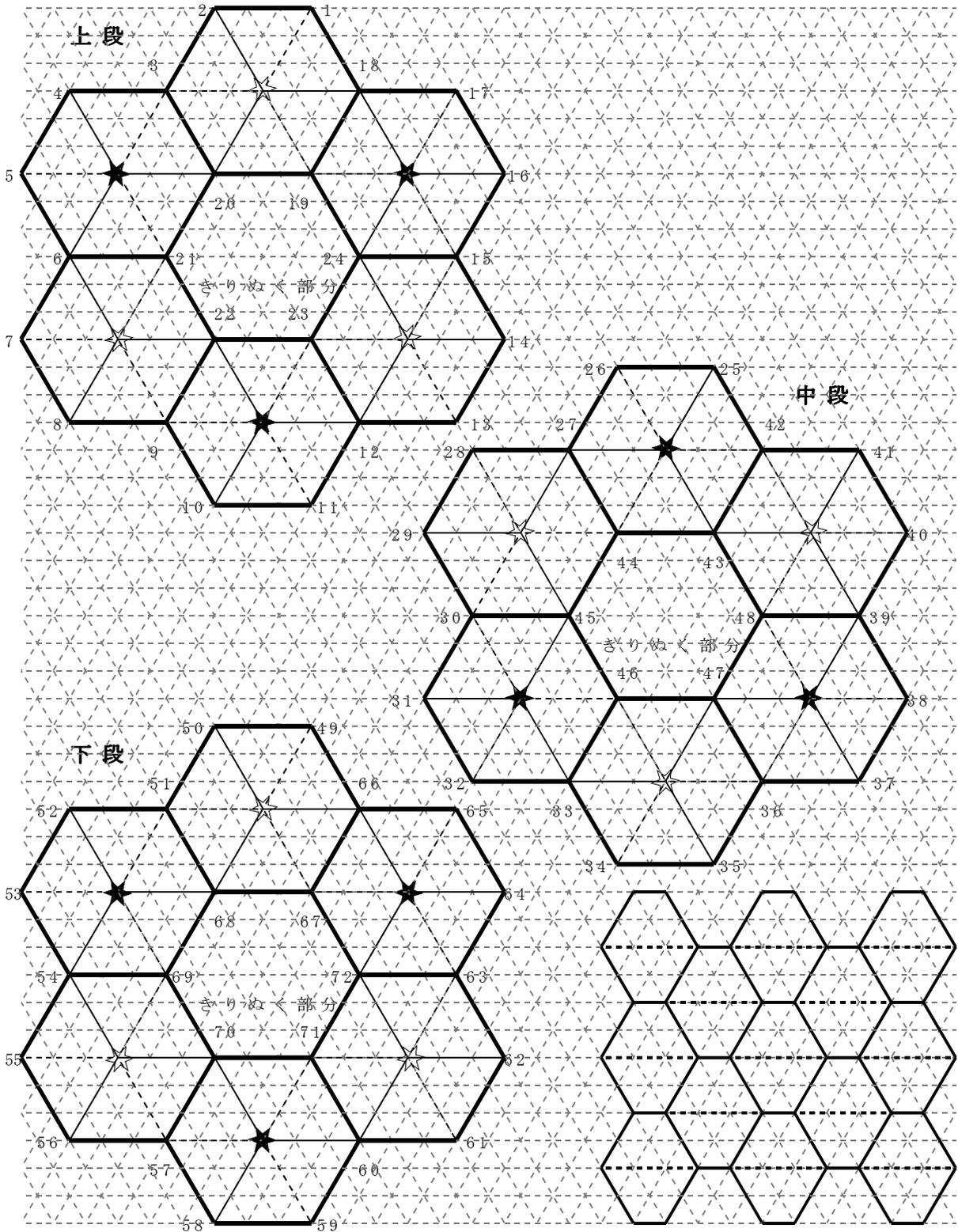
につけたものである。これらをケント紙及びラベルシールに等倍印刷して用いる。

(1) ダイヤモンドの模型骨格

ダイヤモンド（表面）



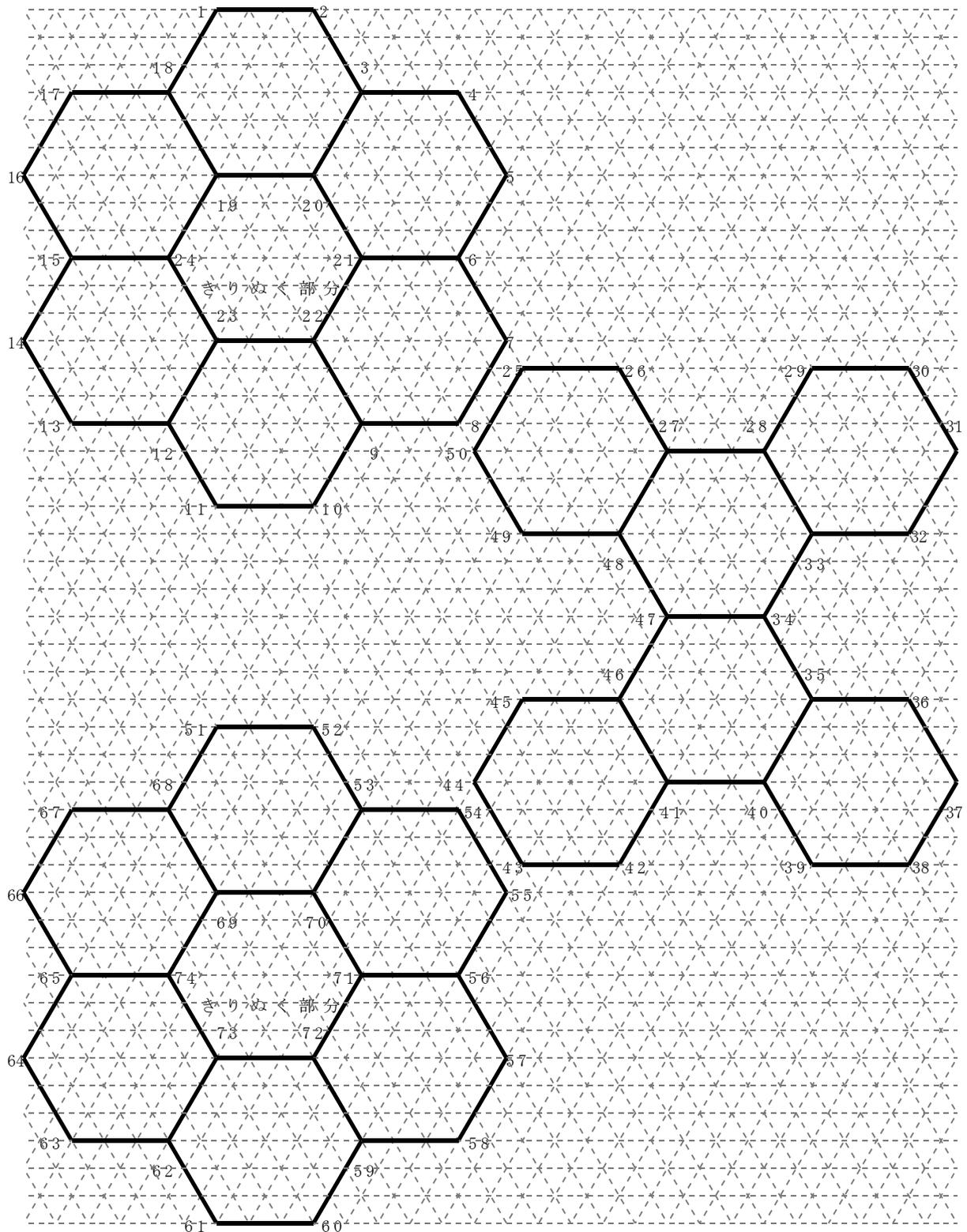
ダイヤモンド（裏面）（ラベルシール印刷用）



C60 組み立て用
接合シール

(2) 黒鉛の模型骨格

黒鉛（表面）



※ 切り取った後、裏面に表面と同様の線（結合）を描く。

(3) C₆₀の模型骨格 (展開図)

C₆₀ (表面)

