

理科に関わる教科横断的教材の開発

—— 授業実践への展開可能性 ——

胸 組 虎 胤

(キーワード：理科，教科横断，教材，授業実践，高等教育と初等中等教育)

1. はじめに

小中高等学校の「教育内容」は、背景にある学問に基づく専門知識や考え方等を、教育目的と学修者の状況に合わせて加工したものである。一方、「教材とは教科書，教授・学習に使う材料，教育活動を成立させる媒介物，文化的素材，学習内容というように，教育内容そのものであったり教育内容を具体化した物品であったり，かなりの広がりを持って使われている。このように教材と内容とは分離しにくいところがある。」¹⁾と理科教材の専門書にある。そして、「教材は教育内容をわかりやすくするための材料であり，教育内容すなわち概念や法則性とは異なっている。一中略一特に，理科では教科の性格上客観性や実証性が重視されるため，教材と言えはほとんどの場合具体的な形や姿をもつものである。」²⁾ともある。つまり、「教材」は手段、「教育内容」は目的であり，理科の教材は具体的な形や姿をもつ。また、「教科内容」は各教科に分類できる「教育内容」の一つ一つと言えるが、「教科内容の構成」は各教科の特質に基づいて系統付けて構成した枠組みと見ることもできる。

各教科内容は各教科の特質を反映しているが，学問分野の構成がそのまま教科内容の構成になるとは限らない。学問は歴史的，系統的な点を重視する側面があり，これが専門性につながる。児童生徒の生きる力の獲得が目的ならば，児童生徒が学問を身に付けるために学問の専門性に基づいた学修を行うことは，必ずしも教科の目的であるとは限らない。したがって，教科の目的を定めることにより，学問体系を構成し直して教科内容とすることが必要となる。

1-1. 教科の特質

人間が各学問の内容と系統性を認識するかによって，その教科を定義する「認識論的定義」が検討されてきた^{3, 4)}。教科がどのようなものであるかについての認識の仕方は，すべての人間あるいは多くの人間にとって共通であるという仮定に基づいているとも見える。この「認識論的定義」を行う意義は，学修者からの認識によって，学問体系を教科として再構成することを目指しているとも考えられる。学修者が自然とその教科内容を受け入れ，理解しやすいと想定している。しかし，この「認識論的定義」は定義する者に依存し，1つしかないというのではなく，様々な定義が可能である。また，「認識論的定義」は思弁的であり，学修者の認識を実験的に証明できるとは限らない。また，「認識」と言うのであれば，各教科の特質を抽出して分類することで，ある教科と他の教科を区別して認識あるいは識別することができる⁵⁾。

1-2. 理科教育の系統性と教科横断的思考

小中高等学校で学ぶ理科の現在の分野は，物理，化学，生物，地学であるが，各分野特有の見方・考え方があるとされる。現在および次期⁸⁾の学習指導要領では，それぞれの分野の中心的概念として，物理に「エネルギー」，化学に「粒子（または物質）」，生物に「生命」，地学に「地球」が設定されている。これら4つの中心的概念は，アメリカのA Framework for K-12 Science Education^{6, 7)}に見られるCore Idea（中心観念）に対応する内容知と考えることができる。

さらに，新しい学習指導要領（平成29年度提示）⁸⁾では，各概念の見方・考え方を次のように説明している。「問題解決の過程において，自然の事物・現象をどのような視点で捉えるかという「見方」については，理科を構成する領域ごとの特徴から整理を行った。自然の事物・現象を，「エネルギー」を柱とする領域では，主として量的・関係的な視点で捉えることが，「粒子」を柱とする領域では，主として質的・実体的な視点で捉えることが，「生命」を柱とする領域では，主として多様性と共通性の視点で捉えることが，「地球」を柱とする領域で

は、主として時間的・空間的な視点で捉えることが、それぞれの領域における特徴的な視点として整理することができる。」⁸⁾

この説明では、4つの概念はそれぞれの見方を持つことになり、内容のまとまり（内容知）を意味するものなのか、見方（方法知）を意味するものなのかが不明瞭となる。さらに、実際には4概念は4つの見方の1つ1つに必ずしも対応しておらず、どれからも捉えることができる。たとえば、「エネルギー」については量的にも、質的にも、多様性と共通性でも、時間的空間的な視点でも捉えることができる。今回の改正では「ただし、これらの特徴的な視点はそれぞれ領域固有のものではなく、その強弱はあるものの、他の領域においても用いられる視点であることや、これら以外にも、理科だけでなく様々な場面で用いられる原因と結果をはじめとして、部分と全体、定性と定量などといった視点もあることに留意する必要がある。」⁸⁾という記述も加えられたが、不明瞭な点は残る。

上記の4概念に限らず理科の内容は自然現象の説明に終始している点があった。社会や実際の技術、工学に結びつける方向性も検討することが必要である。たとえば、その方向性を示した世界的な自然科学教育の新しい潮流がある。STS教育（Science, Technology, and Society Education）⁹⁾、STEM教育（Science, Technology, Engineering, and Mathematics Education）^{10, 11)}がよく知られている。

1-3. STEM教育

2012年にアメリカ学術会議から発行されたA Framework for K-12 Science Education⁶⁾という科学教育の指

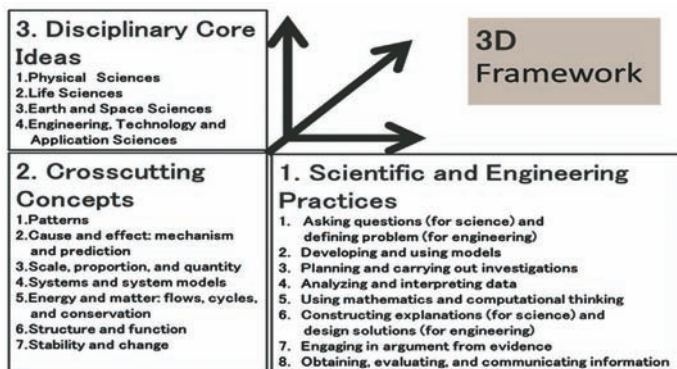


図1-1. K-12 Science Educationの3Dの枠組み
(A Framework of K-12 Science Education⁶⁾の内容から作成した模式図)

針においては、科学、技術、工学と数学を融合させたSTEM教育の枠組みが提案された。3次元（3D）の構造という名称で呼ばれる^{6, 7)}（図1-1）。枠組みの第1次元は科学と工学の実験・実習、第2次元は教科横断の概念、第3次元は教科内容の中心的観念(Core Ideas)で構成されている。また、Technology（技術）については、“Technology is any modification of the natural world made to fulfill human needs or desires.”（「技術とは、人間の必要や欲求を満たすためになされる自然世界の何らかの改良である。」）とされ⁶⁾、Engineering（工学）につい

ては、“Engineering is a systematic and often iterative approach to designing objects, processes, and systems to meet human needs and wants.”（「工学とは、人間の必要や欲求に合致するように、対象、過程、システムをデザインするための系統的で、しばしば繰り返しの取り組みである。」）とされている⁶⁾。

1-4. STEAM教育

STEAM教育^{10, 11)}はSTEMにArts（芸術）を加えて統合し、Science, Technology, Engineering, Arts, and Mathematics Educationとしたものである。STEM教育で扱う教育内容は、自然現象、人間の日常生活の中での技術的、工学的な課題解決のため、1つの解決策を目指す傾向（収束思考）があるが、解決の形は1つではない。他方、芸術は客観的な思考というよりも、芸術を行う個人の主観的価値観が優先する。そのため、個人個人で異なる解決策を模索する拡散思考を促すことにつながる。つまり、ArtsがSTEMに加わることで多面的見方が促され、STEMだけで1つの解決策に固定化されるのではなく、新しい解決策を与える力が生まれるとされる¹¹⁾。

STEAM教育は近年韓国で注目され、推進されてきた¹⁰⁾。また、アメリカでもSTEAM教育に関する理論的および実践的研究が進んでいる¹¹⁾。ここで、ArtsはLiberal Artsであるとする見方も存在するが¹²⁾、本稿ではArtsを芸術に限定している。

2. 高等専門学校で用いた教材の小中高への適用可能性

2-1. STEM 教育と高等専門学校

STEM 教育については多くの考え方があり、その定義に意見の一致は得られていないという見方がある^{13, 14)}。しかし、STEM 教育の対象者についての見方は大きく2つに分けられる。数学や科学の習熟に失敗している多くの中等学校生^{13, 15)}とする見方、幼稚園、初等学校、中等学校から大人も含む大学卒業生までを対象とするという見方^{13, 16)}である。アメリカ教育省 (Department of Education) の学術競争力懇談会 (Academic Competitiveness Council: ACC) による STEM 教育支援の対象については、“The programs cover kindergarten through post-graduate education and outreach---” (「幼稚園から大学卒業とアウトリーチ」) とある¹⁶⁾。本稿では後者の考え方に沿って、対象者を広く捉える。中等学校から大学卒業程度までの学生を対象とする高等専門学校 (以下高専と略す) も STEM 教育に関わると考えられる。

著者はかつて高等専門学校でいくつかの教育方法、教材、教育の評価方法を試みてきた¹⁷⁻³⁴⁾。その内容は学習指導要領を直接意識して作成したものではないが、理系科目の学修に利用できる教育方法、教材等を含む。それは、単なる理科と言える科目と技術や工学につながる科目の基礎には、自然科学という共通の基盤があるからである。多くの高専では低学年から高等学校で学ぶ理科の3科目以上を基礎として学び、さらに専門科目を学ぶ。

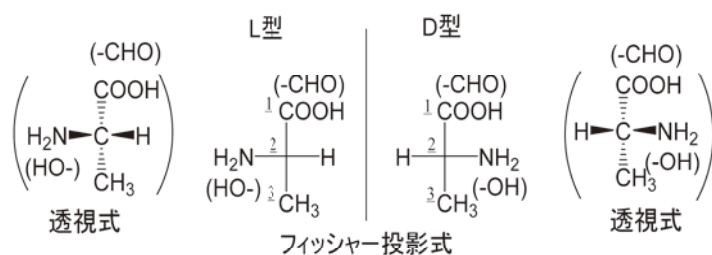
高専は高等教育に、小中高等学校は初等中等教育に分類される学校種であるため、法律上は目的が異なり、教科内容の比較はできないと見られるかもしれない。また、高専の教員経験は小中高等学校とは別とした方が事務的、制度的には整理しやすいかもしれない。しかし、その内実を分析し、比較検討した研究はあまり見られない。教科内容、教員が行う教育形態にも共通点があることは否定できない。本稿では特に高等学校の化学と関連のある有機化学と生物化学の教材について述べ、そこに含まれる他の教科の要素と、小中高等学校での適用可能性を推定した。

2-2. 有機化学の3つのスキルは3つのハードル

有機化学の学修内容は主に構造と反応である。構造で欠かせないのが(1)立体化学のスキルと、(2)命名法のスキルである。構造の要素も含むが反応で欠かせないのが(3)電子の移動と反応で矢印を使うスキルである。これら3つのスキルがあれば有機化学の理解は比較的容易であるが、この3つを身に付けることが初学者にとって困難な場合がある。したがって、この3つは有機化学の理解に欠かせない3つのハードルとも言える。このうち、(2)命名法については規則が明確であり、単純な構造から複雑なものまで時間を少しかけて学べば身に付けられる側面がある。そのため本稿では主に(1)立体化学と(3)矢印、そして、この2つを総合した反応機構の記述を扱う。

2-3. 立体化学

2-3-1. フィッシャー投影式



L型とD型は互いに鏡像の関係

- ▴ : 手前から中央炭素に出る結合
- ▾ : 裏側から中央の炭素に出る結合

図2-1. フィッシャー投影式

立体化学構造を紙面上で表示する方法としてフィッシャー投影式 (図2-1) がある³⁵⁾。フィッシャー投影式ではL型とD型を区別できるが、前提となる分子構造の紙面への書き方が問題となる。まず、炭素の左上に記入してある下線入りの番号は、炭素の連続が最も長い方向に沿って示す炭素の位置であり、フィッシャー投影式ではこの番号に従って炭素を下に記していく。その状態で、キラル炭素 (鏡像異性体を生み出す中心の炭素: 異なる4つの置換基が結合している) の表示は、2番の炭素に結合する置換基の立体的方向性で異なる。フィッシャー投影式では、紙面で上下から、中心の炭素

に向かう結合は紙面の裏側から、左右の結合は紙面のこちら側からと定義されている。ただし、上下の結合はL型とD型で共通であり、左右の置換基が右に来るか左に来るかで立体配置が確定する。

図2-1に示すアミノ酸の例では、左側にアミノ基(-NH₂)があればL型であり、右側に-NH₂があればD型である。アミノ基を水酸基(-OH)に置き換えたオキシ酸でも、L型とD型の関係はアミノ酸と同様である。さらに、カルボキシル基(-COOH)をアルデヒド(-CHO)に変えると糖の構造となるが、この場合にも、縦方向の炭素の位置も上下の結合の向きも変わらないので、L型とD型の関係性はアミノ酸およびオキシ酸と同様になる。

しかし、初学者は、「上下の結合が紙面の裏側から」炭素に、「左右の結合が紙面の手前」という前提を忘れやすい。この課題を解消するため、指を使って、フィッシャー投影式を思い出す方法を考案した(図2-2)¹⁷⁾。

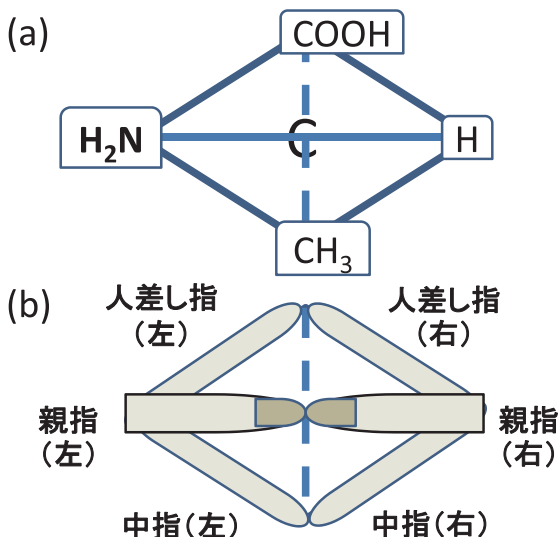


図2-2. フィッシャー投影式を理解する指型モデル

図2-2(a)に示すように、中心の炭素に結合する4つの置換基を線で結ぶと四面体構造ができる。ここで、上下の結合は中心の炭素より裏側に、左右の置換基は中心の炭素より手前に存在する。これはL型のアミノ酸である。この四面体構造を左右の指を使って表現すると(b)のようになる。左右の人差し指の接点は-COOH基の位置、左右の中指の接点は-CH₃基の位置、左右の親指を結んだ直線は-NH₂と-H基とを結ぶ線を示す。

この左右の指で四面体構造を作れば、上下の結合が四面体の裏側にあることを意識できる。強調するために人差し指と中指で鉛筆を抑えて四面体構造を作ってもよい¹⁷⁾。

2-3-2. 折り紙で作るエナンチオマーとジアステレオマー

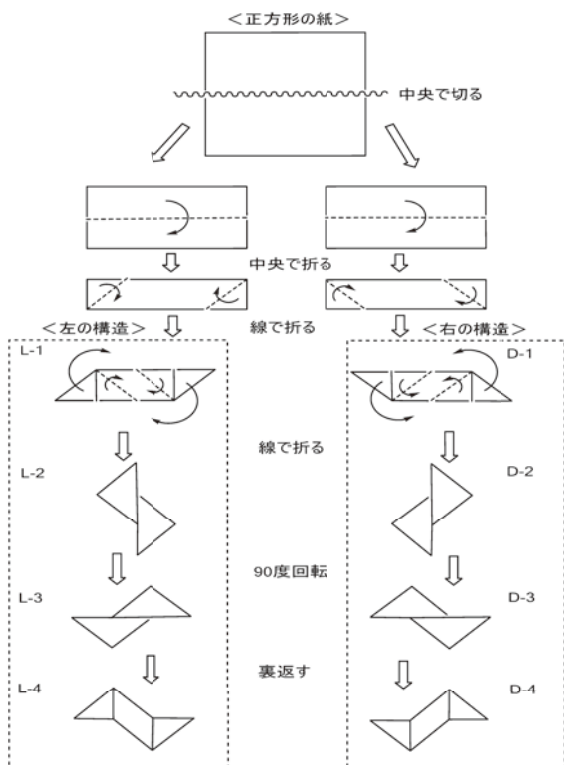


図2-3. 折り紙手裏剣の左右の部品

フィッシャー投影式で示す有機化合物の左右の立体構造を折り紙で表現できる。図2-3に示す折り方で、左右の関係にある形を実際に作る¹⁸⁾(図2-3)。正方形をした折り紙を中央で切って、2枚の長方形とし、各長方形を中央で折り、図に示す点線で折るとL-1とD-1という左右の構造ができる。これらをそれぞれ折ると、L-2とD-2となる。これらを90度回転させると、L-3とD-3となり、さらに裏返すとL-4とD-4となる。ただし、左右それぞれのL-2とD-2からL-4とD-4は同じ構造の向きを変えたものである。ここで、左をL、右をDと呼んでいるのは便宜的であり、どちらを左、右またはL、Dと呼んでもよい。左右は相対的であり、一方を「左」または「L」と呼ぶとそれと鏡像関係の構造は「右」または「D」と呼ぶ必要がある。

厚みがないと仮定した場合、これら構造は平面構造であり、その鏡像関係も二次元での比較であるが、裏返すと裏から見た構造であり、表裏の構造の双方を比較することで、立体的な構造を正しく比較できる。

L-3とL-4は裏表の関係、D-3とD-4も裏表の関係であり、DとL互いに鏡像関係であること

が明らかになれば、立体的にも鏡像関係であることが示される。左右の関係は有機化合物のエナンチオマー（鏡像関係）間の立体的関係性と同様と捉えることができる。エナンチオマー間の関係性を単純な折り紙で表示でき、左右の関係を理解する一つの教材として利用できる可能性がある。

有機化合物の鏡像異性体（エナンチオマー）に関しては高等学校の化学で学ぶ内容である。次に示すのは、高等専門学校、大学で学ぶジアステレオマーについてである。ジアステレオマーはキラル中心を複数持つ有機化合物の立体異性体のうち、エナンチオマーでない関係である。たとえば、左手と右手、左足と右足に関係はそれぞれエナンチオマーの関係であるが、手と足の組み合わせを考える。左手+左足と右手+右足の立体的関係はエナンチオマー、左手+左足と左手+右足の関係はエナンチオマーではなく、ジアステレオマーの関係になる。

フィッシャー投影式の **L** と **D** という立体配置の表示法を使うと、**L** と **D** の関係はエナンチオマー、**L+L** と **D+D** および **L+D** と **D+L** の関係性もエナンチオマーである。一方、① **L+L** と **L+D**、② **D+D** と **D+L**、③ **L+L** と

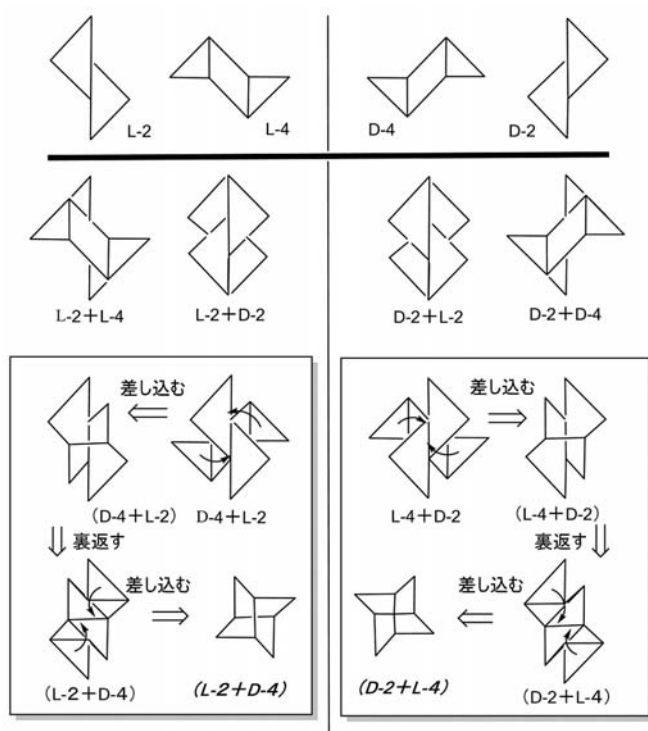


図2-4. エナンチオマーの組み合わせとジアステレオマーの表現

④ **D+D** と **L+D** の関係性はジアステレオマーとなる。以上は理論的な記述であったが、これを再び折り紙を使った方法でさらに詳しく見ていくことができる。図2-4にエナンチオマーとジアステレオマーの関係を示す。

図2-3に示す **L-2**、**L-4**、**D-2**、**D-4** を再び用いる。**L-2** と **L-4** は平面的には異なる形に書かれているが、同一の構造であり、視点（裏表）を変えて示してあるだけである。

その下に示す **L-2+L-4** などの記述は、**L-2** の上に **L-4** を置いた構造を示す。置き方は無数にあるが、**L-2+L-4** 等の構造を図2-4に示すものと定義する。

この図で、**L-2+L-4** と **D-2+D-4**、**L-2+D-2** と **D-2+L-2** はそれぞれエナンチオマーの関係にあるが、**L-2+L-4** と **L-2+D-2**、**L-2+L-4** と **D-2+L-2**、**D-2+D-4** と **L-2+D-2**、**D-2+D-4** と **D-2+L-2** はそれぞれジアステレオマーの関係にある。

さらに、その下に四角で囲まれた箇所に左右4つずつの折り紙の絵が描かれている。今まで説明してきたジアステレオマーとは異なる構造の構造が書かれている。**D-4+L-2** と **L-4+D-2** は単純に見るとエナンチオマーの関係にあるように見える。左右の四角の中で操作に従って、折っていくと (**L-2+D-4**) と (**D-2+L-4**) という手裏剣が完成する。しかし、これらをそれぞれ裏返すと (**L-2+D-4**) は (**D-2+L-4**) に、(**D-2+L-4**) は (**L-2+D-4**) になる。つまり、これらは立体的には同一の形であった。それは差し込む以前に並べた最初の形からである。このような関係はキラル中心を二つ持つ化合物のうち、メソの関係にある化合物に対応する。したがって、この並べ方、手裏剣を作る過程から、メソの関係を説明することが可能となる。

具体的な有機化合物を上記のモデルに対応させることができる。鎖状のアラニルアラニン (**Ala-Ala**) というジペプチド(図2-1に示すアミノ酸2つ脱水縮合した物質)には **L-Ala-L-Ala**、**L-Ala-D-Ala**、**D-Ala-L-Ala**、**D-Ala-D-Ala** という立体異性体が可能である。それら間のエナンチオマーとジアステレオマーの関係は明快である。一方、**D-Ala-L-Ala** が環化した環状ジペプチド **Cyclo-(D-Ala-L-Ala)** がある。**L-Ala-D-Ala** が環化しても同一化合物である **Cyclo-(D-Ala-L-Ala)** (メソ体) を生じる。

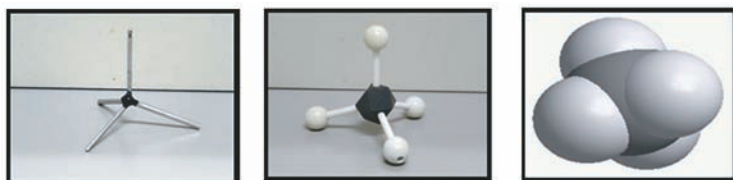
以上の折り紙教材はキラル中心を持つ有機化合物の立体構造の理解に利用できるが、その対象は高等学校から大学水準であろう。高等学校でも発展的学習にも使える可能性がある。また、これらの教材は幾何学的要素と形を整えるという点で芸術的側面も含んだ教科横断的な性格があるとも言える。

2-3-3. 手組み分子モデル

分子モデルを組むことは折り紙よりも分子の3次元構造を想像させやすいと考えられる。折り紙モデルでは立体感が乏しいが、分子モデルはそれを補える。また、分子モデルを組むことは実際の分子を組んでいるわけではないが、その拡大版を扱う一種のシミュレーションであり、実験の一つと見ることができる。^{22, 23, 28)}

分子モデルには様々なものが知られているが、そのうち主なものを次に挙げる(図2-5にその形が表示)。

1. ドライディングステレオモデル (Dreiding Stereo-model)
2. HGS モデル (HGS: Hinomoto Gouseijushi Seisakusho (日ノ本合成樹脂製作所))
3. CPK モデル (CPK: Cory-Pauling-Kolton)



ドライディングモデル

HGS モデル

CPK モデル

図2-5. 典型的な分子モデルの例

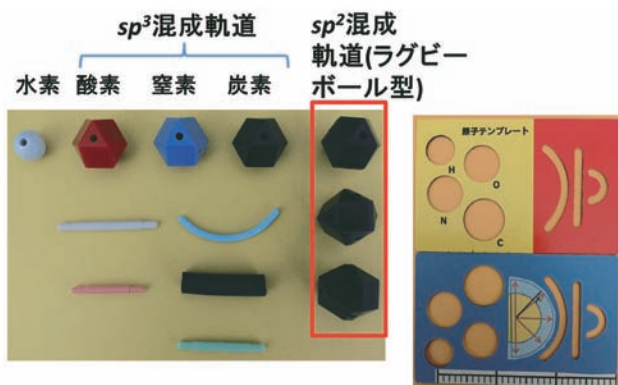


図2-6. 手で組む分子モデルの部分と原子テンプレート

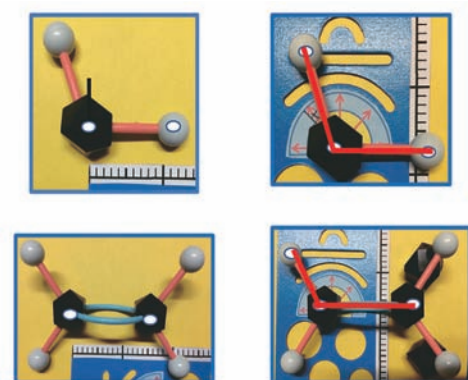


図2-7. 結合距離と結合角度の測定

結合角度は分度器を当て測定する(図2-7)。これには最も単純な炭素化合物であるメタン, エタン, エチレン, アセチレンをまず使用する。C-HとC-Cの単結合, C=C二重結合, C≡C三重結合の距離を測定し, 比較させる。角度も測定させ, 相対比較をさせる。これらの基本情報をノートまたはワークシートに記録させる。

- (4) 分子モデルの見取り図を描く(図2-8)。メタンの場合, すでに測定したC-H結合の距離を隔てたところに鉛筆で2つの点を打ち, それを中心に, 原子テンプレートの対応原子の円を描く。この2点間の距離は実際の分子モデルのC-H結合と等しくなり, 「基準結合」と名付ける。

ドライディングステレオモデルは, 原子間の結合距離, 結合角度を正確に表現しており, 原子間の相対的な位置関係を見るのに適している。しかし, 各原子は点でしか示されておらず, 電子雲を含めた原子の大きさを把握出来ないのが弱点である。HGSモデルは原子間の結合距離, 結合角度ともに正確に表現しており, 電子雲の一部を表現し, 安価である。しかし, 電子雲を一部しか表現しておらず, 立体障害を見るのには不十分である。CPKモデルでは, 原子がファン・デル・ワールズを持った半球として表現されているため, 電子の占める領域と立体障害も含めた分子の実体を把握するのに都合がよい。しかし, 原子の中心位置が見えにくく, 結合距離や結合角度を見るには難がある上, 非常に高価である。分子モデルには長所, 短所があるため, 用途に応じて使い分ける必要がある。

以上の中で, 原子の位置と結合が特定でき, 原子の大きさの相対比較もある程度可能なHGSモデルを用いた実験プログラムを長年実施してきた。ただ組ませるだけでなく, 組んだ分子モデルを描かせることで, 分子の原子間の立体的位置関係をより把握できると考えられる。この実験では特に, 原子間距離と結合角度を測定することを行う。次のような手順でおこなった。

- (1) 図2-6にあるような図を示して部品と分子モデルを描く定規(原子テンプレート)の説明をする。

部品は原子の種類で色分けされており, 結合はその種類で形状と長さが異なる。原子テンプレートには原子の外形を描く穴, 結合を描く穴があり, 定規と分度器が取り付けられている。定規の尺度は1 Å (0.1nm)を2.5cmで示している。

- (2) 原子間の結合距離は原子の中心から中心までを測定する。

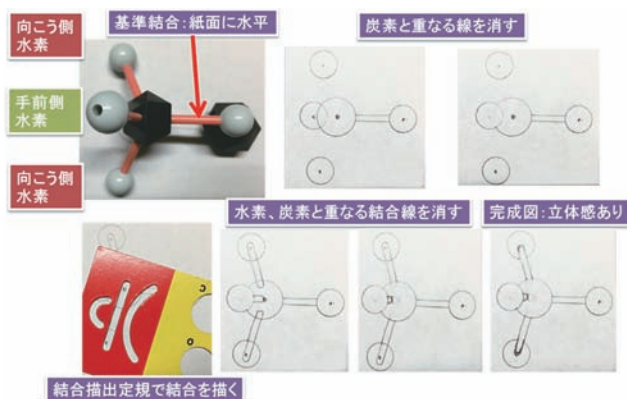


図2-8. 分子の書き方

ン, D-アラニン, L-アラニン, D-グルコピラノースの α と β の異性体を作らせる。見取り図は, 2-ブテンの cis と trans の異性体, シクロヘキサンの椅子型と舟形, D-アラニン, L-アラニンについては描かせる。他の化合物については写真を取らせ保存させる。

- (8) 分子モデルの直径(一番距離の離れた原子間の長さ)を定規で測定させる。
- (9) 6人から8人のグループを複数つくり, 各人に α -D-グルコピラノースを作らせ, それらを α (1→4) 結合で結ばせて環状デキストリン(シクロデキストリン)を作らせる。出来上がった分子モデルを写真撮影させる。

図2-9は7つのグルコースから成る β -シクロデキストリンの構造と組み立てた分子モデルの写真を示す。

(a)シクロデキストリンの構造 (b)シクロデキストリンの分子モデルの写真

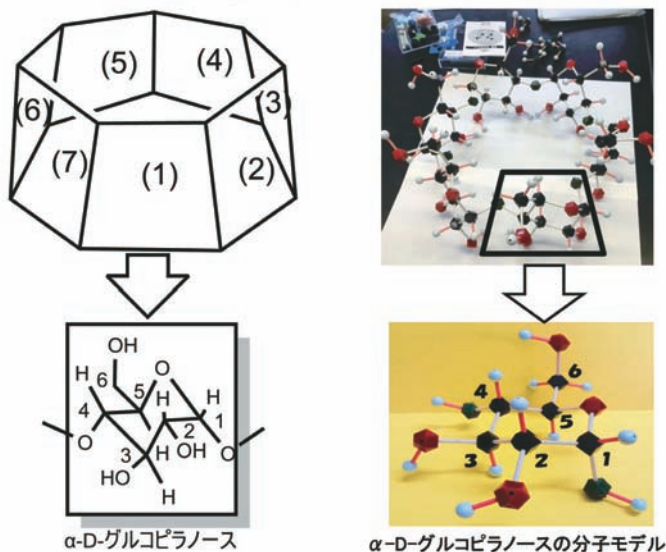


図2-9. シクロデキストリンの構造と分子モデルの写真

- (5) 分子モデルの「基準結合」紙面と平行に配置して, 紙面の真上から真下に見て(垂直方向), 投影された他の原子の中心に点を打つ。
- (6) 結合で原子を結んだ後, 「基準結合」より裏側にある原子と手前にある原子を空間的に区別できるように, 一度描いた線を消し, 描き足して, 結合が出る箇所と原子の見え方を修正する。
- (7) 複雑な有機分子として, 2-ブテンの cis と trans の異性体, シクロヘキサンの椅子型と舟形, デカリンの cis と trans の異性体, アダマンタン, ベンゼン, ナフタレン, アントラセン

左の構造では7つの台形が環状につながる立体を表現しており, (1)の台形は1つの α -D-グルコピラノースの単位構造であるので, 構造式を左下に示す。写真では台形に囲まれた構造が α -D-グルコピラノースであり, その個所の拡大した分子モデルを右下に示す。

以上の分子モデルを使った実験は, 高等専門学校物質工学科の1年生, 3年生, 5年生に対し, 授業内容の水準に合わせて実施してきた。現在鳴門教育大学の2年生対象として化学実験Ⅱでも実験テーマとして実施している。この実験は各人が有機化合物の構造について理解すること以外に, 最後のシクロデキストリンを数名で組み立てるため一種の協働作業である。

内容の水準は中学校, 高等学校から高専, 大学まで広く適用できる。分子の形を作り整えるという点では, 幾何学, 芸術的な内容を含んでいると考えられる。

2-3-4. コンピューター画面上で分子モデルを組む

最近, 手で組む分子モデルではなく, コンピューター上で分子モデリングソフトを用いて分子の形を立体的に描出させることも一般的に行われている。この方法を用いると, 速やかに分子モデルの構築が可能であり, かつ, 複雑なモデルを組み上げることも比較的簡単な場合がある^{25, 26, 28)}。さらには, 最安定な配座を計算し, 生成熱を求めること, 反応の遷移状態の検索や活性化エネルギーの推定まで可能な分子モデリングソフトも市販されている。分子モデリングソフトには様々なものが知られているが, その多くは, (1)分子力学モデル, (2)分子軌道法に分類される。前者は分子を構成する原子を剛体と見なし, 原子間の結合がフックの法則に従うと仮定して構

表 2-1. 化学計算プログラムの例

種類	名称	特徴
分子力学計算	MM2	Allingerが開発
	MMFF94	Merk社が開発
分子軌道計算	Gaussian	多電子系電子運動の解析 (Hartree-fock) : 非経験的方法
	MOPAC	AM1, PM3, PM5, PM6, PM7 などの Hamiltonian : 半経験的方法
密度汎関数法計算	DFT	化学構造, 化学反応性, 計算精度および速度が優れ, 適用範囲が広い

分子軌道法で精密な安定構造の計算をするのが一般的である。

後者の分子軌道法はさらに非経験的方法 (*ab initio methods*), 半経験的方法 (*semi-empirical methods*) に分類される。非経験的方法は理論的モデルから直接に分子の構造を求める方法であり, 半経験的方法は理論モデルと実験値とをうまく合致させるためのパラメーターを選ぶことにより, 未知の結果を推定することに用いられる。さらに, 最近, 電子密度を計算することによって, 化合物の構造, 反応性などを高い精度で求められる密度汎関数法 (DFT: density functional theory) がよく使用されるようになってきた。計算ソフトの例を表 2-1 に示す。

表 2-1 に示す単一ソフトウェアだけでなく, 複数を選択して利用できるようセットも売られている。たとえば, CAChe, SCIGRESS, Spartan などが知られている。初学者を対象として有機化学を学修させるにはまずは構造を組み立て, ある程度の最適構造を描出させ, 結合距離と結合角度を求める演習が有効であろう。CAChe の機能は SCIGRESS に組み込まれ, 今は市販されていないが, 著者は高等専門学校の実験で使用していた。まず, コンピューターの画面上で有機分子を組ませて, MM2 計算で最適構造を作らせ, 結合距離や結合角度などの測定を行わせた。このソフトは高価であるため, 学生や児童生徒が購入することには適さない。

しかし, フリーソフトが解説書付 2000 円未満で売られているものもある。たとえば, Chem Sketch³⁶⁾ は, Windows

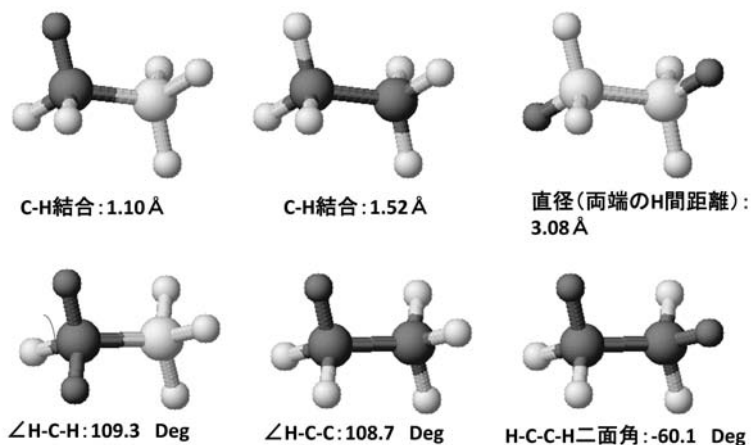


図 2-10. Chem Sketch で描いたエチレン (C_2H_4) の原子間結合距離と結合角度

このテーマの水準は高等学校, 高等専門学校, 大学に相当するであろう。高等学校では個々の生徒がコンピューターで組むことも可能であるが, 教師がコンピューターとプロジェクターを使って, 画面上に提示する授業も可能である。ただし, 自分たちで分子を画面上に組んだ方が分子の構造への理解と立体認識が深まるであろう。さらに, この実験は幾何学的, 芸術的な側面も併せ持つ。

2-4. 有機化学の矢印^{19, 24)}

2-4-1. 矢印の種類

有機化学で用いる矢印 (図 2-11) は, (A) 反応を示す矢印, (B) 構造を示す矢印, (C) 電子の移動を示す矢印の 3 種類がある。(A) 反応を示す矢印は, 不可逆反応 (または素反応), 可逆反応, 連動反応に分類できる。(B) 構造を示す矢印は, 共鳴構造を示す矢印と立体反発を示す矢印に分けられる。(C) 電子の移動を示す矢印

築したプログラムである。そのため, 扱う関数の数が少なく計算速度が速いのが特徴であり, 分子内における原子間反発による安定なコンホメーションの検索に適している。しかし, 分子軌道の計算を含まないためやや正確さに欠ける面がある。したがって, 最初は分子力学計算によって, だいたいの安定構造を速やかに計算し, その後, 分

が OS のコンピューター上で使用できる。鳴門教育大学ではこのソフトを用いた学生実験 (化学実験 II) を行っている。このソフトを用いると, 分子モデルを手で組むのに比べ, 効率的に画面上で分子を組めた。たとえば, エタンの構造に関して構造上の計測を行うことができる (図 2-10)。

結合距離を測定する場合, 2つの原子をクリックすると画面上に距離が表示される。結合角度および二面角についても表示が可能である。測定は手で組んだ分子モデルよりも容易である。

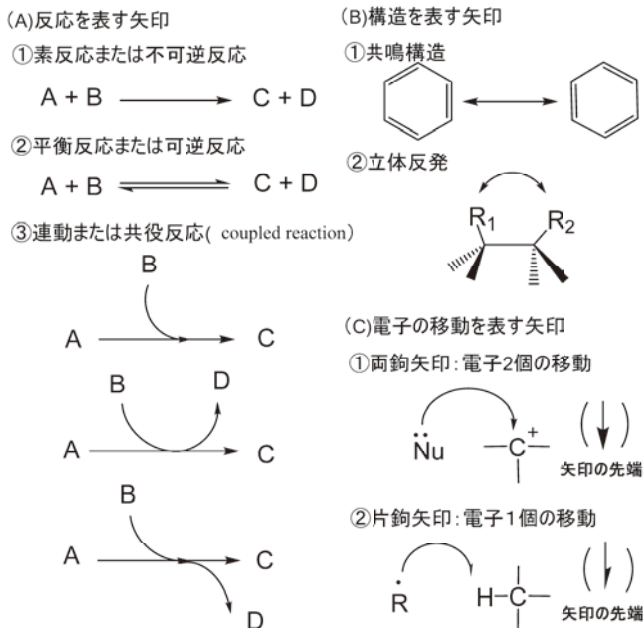


図 2-11. 有機化学で用いる矢印の種類

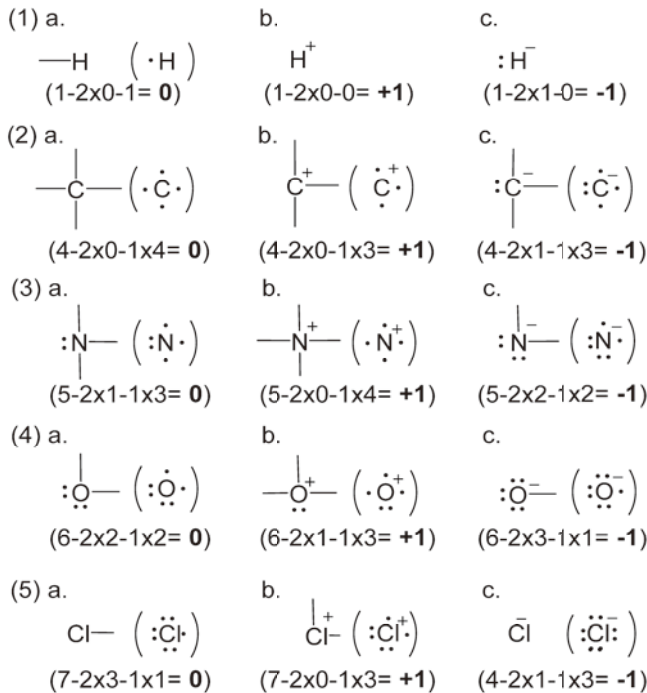


図 2-12. 水素, 炭素, 窒素, 酸素, 塩素上の最外殻電子と形式電荷

り誘起される反応の表示に用いられる。一方, 片方だけ鉤を持つ矢印の場合, 電子1つの移動を示し, ラジカル反応の表示に利用される。両鉤矢印の使い方と共通しているのは, 矢印を書く起点は電子であり, 終点は電子の不足している箇所または電子の向かう先である。②に示す片鉤矢印の例であるように, 矢印が R のラジカルの電子から始まり, H 原子付近が終点となっている。これはラジカルの水素引き抜きを意味し, 水素を引き抜かれた後の炭素原子はラジカルとなるので, H-C の結合から炭素方向に片鉤矢印を書くこともある。

有機化学ではこれらの矢印を使って, 反応機構を示すことがあるが, 電子の流れを使うと中間体を構成する原子上の電荷がプラスかマイナスか, あるいはゼロであるか, またはラジカルかを書くことでより詳細な反応機構を記述できる。そのため, 反応の前後で, 原子上の電荷がどのように変化するかを知っておく必要がある。

には先端が両鉤矢印になっているものと先端が片鉤矢印になっているものがある。前者は電子対の移動を示し, 後者は電子1個の移動を示す。

不可逆反応は反応が右側に進行し, 左側には進行しにくい反応である。これは右方向の反応の活性化エネルギーが, 左方向の反応の活性化エネルギーに比べ著しく小さい場合であり, 見かけ上反応が進行していないように見える。また, 素反応は中間体が生成しないで1つの遷移状態を経る単一の反応であることを意味する。可逆反応は左方向と右方向の反応が同時に進行し, 左右の物質の濃度が一定になる(平衡になる)まで見かけ上の濃度変化が進行する。連動反応は代謝反応の一連の流れを示すことによく使用される。

たとえば, クエン酸回路(TCA 回路: Tri-carboxy Acid Cycle) のように, 最初の出発物質が一連の反応を経た後同じ物質に戻る場合などには利用しやすい。ここで, たとえば A と B が反応して, C と D が生成する反応 ($A+B \rightarrow C+D$) の別な表現法が, 連動反応の2番目の反応に相当する。わざわざ, 連動反応の矢印を用いる理由は原料である A と生成物である C に注目しており, C がさらに反応して別な化合物になることを示そうとするためである。この矢印を用いると, 生体内での代謝反応による物質の変化を体系的に表示できる利点がある。

構造を示す矢印のうち共鳴構造を示す矢印の左右の構造は極端な構造を提示した者であり, 極限構造式(限界構造式)と呼ばれる。実際の構造はこれらの極限構造の間構造であることを示す。立体反発を矢印で示すことは多くないが, たとえば, R_1, R_2 という置換基が嵩高く互いに反発し合うことを表示することがある。

電子の移動を示す矢印は2種類あるが, 矢印の先端の両側に鉤が付いている方は電子2つの移動を示し, イオン反応, 分極構造によ

2-4-2. 原子価の示し方

有機化学でよく扱われる元素である水素 (H), 炭素 (C), 窒素 (N), 酸素 (O), 塩素 (Cl) の原子上の電荷を図 2-12 に示す。各元素が共有結合を形成している場合の形式電荷を **a** (0) と **b** (+) と **c** (-) に分けて示している。

また、カッコ内には各元素の最外殻にある電子 (価電子) を電子式で表示している。ここで、各元素の形式電荷は次のように示せる。

$$\text{形式電荷} = (\text{価電子数}) - 2 \times (\text{孤立電子対}) - 1 \times (\text{共有結合数})$$

最外殻の電子数が価電子数に等しいときは原子の形式電荷はゼロ (0), 最外殻の電子数が価電子より少ない場合にはプラス (+), 価電子より余分にある場合はマイナス (-) としているためである。たとえば, (2)b の炭素の場合, 価電子数=4, 孤立電子対=0, 共有結合数=3 であるので, 形式電荷は次のように示せる。(2)b の形式電荷 = $4 - 2 \times 0 - 1 \times 3 = +1$ となる。また, 原子が多重結合をもつ場合, 二重結合では結合数が2, 三重結合は結合数3と数える。ここで, (5)b について, プラスの電荷をもつ Cl は知られていないが, 共有結合を二つ持つことがあれば, Cl の電荷が+であることを示している。

2-4-3. 反応機構の書き方

これまで示した矢印の使い方, 原子価の表示方法の知識を使うと「反応機構を記述する」ことができる。

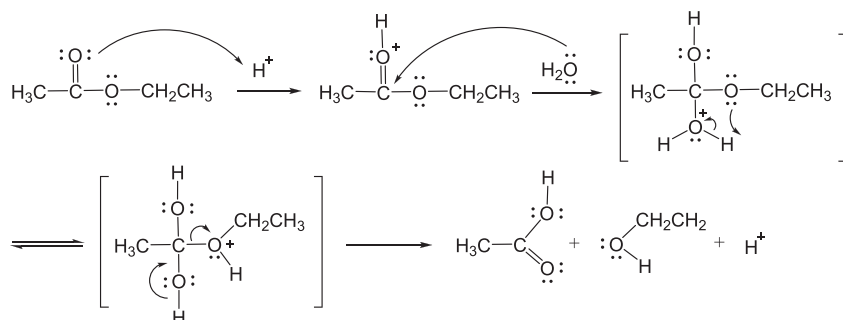


図 2-13. 酸触媒による酢酸エチルの加水分解の反応機構(例)

図 2-13 の反応機構は酸触媒による酢酸エチルの加水分解を書いており, まず, 水素イオンが酢酸エチルのカルボニル酸素に結合して分極が進み, 水分子がカルボニル炭素を攻撃して四面体中間体 (実際には立体的構造) ができる。この中間体からエタノールが脱離して酢酸が生成する。屈曲矢印は両鉤型となっ

ており, 電子対の移動により結合の形成と切断が進行することを示している。また, 酸素上の電荷は形式電荷を示している。これにより, 電子の移動と電荷の変化が記述されている。反応機構の書き方はこのように反応の前後で矛盾がないことが重要である。

2-5. 酵素反応と連動反応矢印

有機化学で使用する矢印を使って, 生体内の代謝を物質の変化として表現することがある。生物化学反応機構 (『マクマリー生物化学反応機構』³⁷⁾, 『マクマリー有機化学-生体反応へのアプローチ』³⁸⁾, 生物化学のテキスト (『ヴォート生物化学』³⁹⁾ など) では代謝の反応機構の詳細な記述をしている例がある。しかし, これらを除けば一般的な生物のテキストで, 代謝経路を有機化学反応機構と同様に詳細に記述することは少ないかもしれない。代謝においては酵素がその反応を触媒するというやや複雑な機構が存在するからであろう。

酵素反応は必ずしも低分子の酸塩基触媒による反応ではなく, 1つ1つの反応が異なる酵素によるのと, 1つの酵素反応でも複雑な過程を経る。1つの酵素が触媒する反応では, 反応基質 (酵素による触媒で反応を受ける物質) が酵素と酵素-基質複合体を形成した後に反応が進むとされる。この酵素-基質複合体の形成が酵素の3つの特異性 (基質特異性, 光学特異性, 反応特異性) に関係する。ここで, 触媒である酵素分子を実際に反応が進む箇所 (活性中心) とそれ以外の箇所に分けて考えると分かりやすい。さらに, 実際の反応が進む活性中心も基質結合部位と反応部位に分けることができる。

活性中心にある基質結合部位に結合できるかどうかで基質特異性 (光学特異性はその一例) が決まり, 触媒部位にどのような触媒基が存在するかで反応特異性と最適 pH が決まる。基質結合部位の働きを擬人的表現で示すと, 「反応基質を認識している。」ことになる。基質結合部位の物理的な大きさと, 基質結合部位にある置換基が基質とほどこい分子間相互作用 (水素結合, ファン・デル・ワールス力, CH- π 相互作用, 疎水相互作用等) をすることで認識が行われる。基質認識については Lock and Key theory, Fit induced theory などが知られている。

触媒部位に存在するのは、①酵素分子のタンパク質を構成するアミノ酸残基、②補酵素、③無機イオン、④補欠分子族などである。①は必ず存在するが、②から④補因子と呼ばれ、存在する場合とそうでない場合がある。①の触媒基は複数あることが多く、それらは連携して触媒作用をするので、ある程度近接して存在していることが必要である。これらの記述からもわかるように酵素反応は単純な有機化学反応ではなく、かなり複雑である。そのため、酵素反応の記述と説明には多くの時間を要する。酵素分子の活性中心以外の部分は、活性中心の形を保持している。酵素の活性中心は3次元構造をしており、基質結合部位と触媒部位のそれぞれに一定のアミノ酸の側鎖が存在し、決まった基質認識と決まった触媒作用をしている。この触媒部位の構造が崩れると酵素は触媒作用をしなくなる。活性中心以外の部分はS—S結合（ジスルフィド結合）を持つものが知られている（たとえばリゾチーム（Lysozyme））。この結合は共有結合であり酵素の3次元構造を安定化する働きがある。

以上のように、有機化学で用いる矢印を使って、酵素反応一つ一つを詳細に記述する方向性もあるが、複数の酵素反応を連続的に見ていくことも代謝の全体的な把握には必要である。たとえば、生体高分子の構成要素であるアミノ酸、核酸塩基、単糖の代謝、あるいはその他の有機化合物であるカルボン酸などの代謝を、種々の酵素の連続反応として捉える場合には別な示し方がある。また、連続がサイクルになる回路として捉えられている反応もある。たとえば、TCA回路(tricarboxylic acid cycle：トリカルボン酸サイクル、またはクエン酸回路、Krebs回路)^{20, 30, 37)}があり、先に示した連動反応の矢印を用いて表示できる(図2-14)。

まず、この図に示すTCA回路の各反応の説明を(1)から(9)まで順に行う。

(1) 一番上には、アセチル CoA (C2) がオキサロ酢酸と反応してクエン酸 (C6) が生成するところから始まる。

(2) クエン酸から水が脱離して cis-アコニット酸 (C6) となる。

(3) これに水が付加してイソクエン酸 (C6) が生成する。この水の脱離と付加はアコニターゼという1つの酵素により触媒されるので、酵素反応生成物がイソクエン酸であり、cis-アコニット酸を生成物として記載しないテキストも見られる。しかし、本稿ではこれを記載する。

(4) NAD⁺が補酵素として働いてイソクエン酸を酸化してNADH+H⁺を生成し、脱炭酸が進行してα-ケトグルタル酸 (C5) が生成する。

(5) NAD⁺とHS-CoAが作用し、酸化反応でNADH+H⁺を生成し、脱炭酸とスクシニル化が起こった結果、スクシニル CoA (C4) が生成する。

(6) GDPと無機リン酸が作用してGTPが生成するとともに脱炭酸が起こって、コハク酸 (C4) が生成する。

(7) FADが作用して酸化反応でFADH₂が生成するとともにフマル酸 (C4) が生成する。

(8) 二重結合に水が付加してリンゴ酸 (C4) が生成する。

(9) NAD⁺が作用して酸化が起こりNADH+H⁺を生成し、オキサロ酢酸 (C4) が生成する。

このサイクル全体を把握するために重要な点は、各化合物の炭素数の変化と水素の脱離数である。各反応生成物の炭素数はクエン酸でC6であり、(1)C6、(2)C6、(3)C6、(4)C5、(5)C4、(6)C4、(7)C4、(8)C4、(9)C4となる。

水素が脱離するのは、(4)、(5)、(9)でそれぞれNADH+H⁺として2Hが抜ける。(7)FADH₂として2Hが抜ける。以上で8Hが抜けることになる。これらの化合物は呼吸鎖（電子伝達系）に移って酸化され、ATPの合成につながる。また、(6)で生

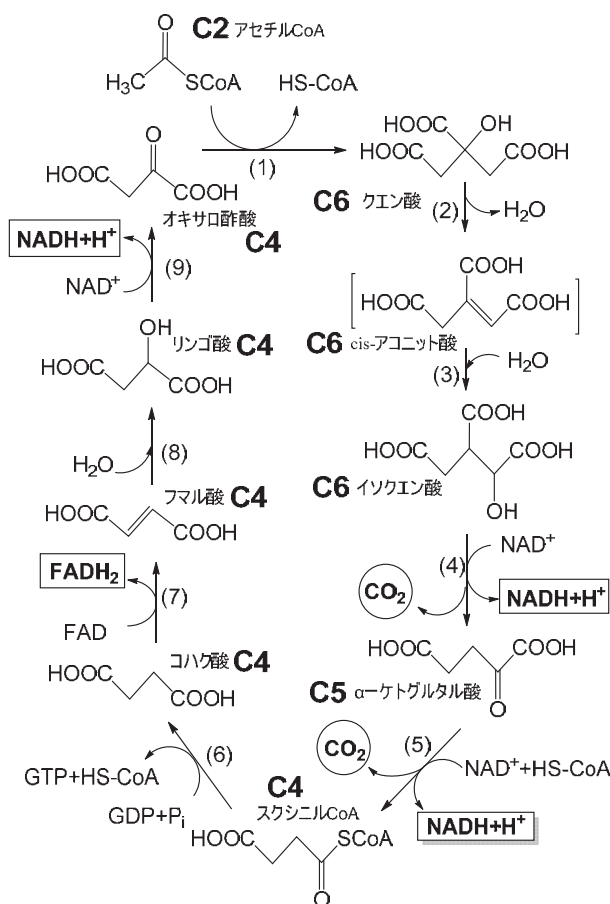


図2-14. TCA回路（クエン酸回路、クレブス回路）の反応

成した GTP は ATP の合成に使われる。

たとえば、この回路の炭素数と水素の脱離数を記憶する 1 つの方法として、以下の覚え方を考案した³¹⁾。

炭素数では、炭素数—ろくろくろくご(6665)—ししししし(4444)—ろくひくよんは二(6 - 4 = 2)脱炭酸
水素数では、水素数—などなどふぁどなど(NAD NAD FAD NAD)—八水素—取られてしまって呼吸鎖へ行く

以上のような TCA 回路での詳細な化学反応の説明は、高等学校の生物では提示されていないが、発展的学習を化学と連携して行うことができると考える。「五七五七七」という和歌と同じ語数の配列になっていることで言語芸術要素を含んでいることが覚えやすさにつながるとも考えられる。

3. 立体化学と矢印の使い方に関する教材の小中高等学校での適用可能性

上記の立体化学と矢印に関する教材の小中高等学校への適用可能性と教科横断的要素を表 3 - 1 にまとめる。

表 3 - 1. 立体化学と矢印の使い方に関する教材の小中高等学校での適用可能性

教材名 ^{a)}	下記学校種での適用可能性 ^{b)}			適用可能性と複数教科的要素
	小学校	中学校	高等学校	
指で作るフィッシャー投影式 (図2-2)	±	+	+	・四面体の構造がわかりにくく、フィッシャー投影式を扱わないため工夫が必要。 ・化学、数学、芸術的要素。
折り紙で作る分子モデル (図2-3, 2-4)	++	++	++	・折り紙で左右の関係を扱うのは簡単であり、小中高まで空間認識のスキル育成に使える。 ・化学、数学、芸術的要素。
手で組む分子モデル (図2-5~2-9)	±	+	++	・小学生は組み立て可能だが、見取り図作成は困難。中学生は図の作成可で協働に適する。 ・化学、数学、芸術的要素。
化学計算プログラム (図2-10)	+	+	++	・練習で分子モデルの組み立ては身に付けられるが、構造の意味については高校以上が可。 ・化学、数学、芸術的要素。
矢印 (図2-11)	±	+	+	・中学高校以上が利用可能。 ・化学、数学、芸術的要素。
電子式 (図2-12)	±	±	++	・中学校以下は原子構造の知識がないと困難、高校以上が適用可。 ・化学、数学、芸術的要素。
反応機構 (図2-13)	±	±	+	・中学校以下は原子構造の知識がないと困難、高校以上は場合は生徒の水準により適用可。 ・化学、数学、芸術的要素。
TCA回路の表示 (図2-14)	±	±	++	・小中学校で理解困難、高等学校では適用可。 ・化学、生物、数学、芸術的要素。
炭素と水素に特化したTCA回路の覚え方	±	+	++	・中中で原子数の変化を理解するのに適用可。 ・化学、生物、数学、芸術的要素。

a) 教材を提示する図等はカッコ内に記載。

b) 各学校種への適用可能性を± (困難がある) ; + (適用可) ; ++ (十分適用可) として示す。

この表にまとめる教材の評価については、各学校種の教育内容と教材に含まれる学修要素から推定したものである。これらの教材の多くは形を扱う点で、幾何学的 (数学)、空間的認識の育成に使えることが考えられる。また、絵を描き、形を整えて表現する点、一定の語数を使ってリズムカルに記憶する点では芸術要素を持っていると考えられる。また、代謝反応である TCA 回路の表示法については生物学的要素が含まれる。ここに示すほとんどの教材は高等専門学校の 1 年から 3 年までに用いたものであるため、年齢的には高等学校と重なる。使用した教材に含まれる教育内容の要素が小中学校と重なる部分もあると考えられる。今後、教科の要素をどのようなものと厳密に定義するか、また、それらがどの程度教材に含まれているか、そして、これらの教材を使った実際の授業展開が課題であると考えられる。

4. おわりに

本稿では、高等専門学校での専門科目で使用した有機化学と酵素反応に関連する教材の内容記述と小中高等学校への適用可能性について扱った。今回はこれらの教材の技術的、工学的側面は抽出できなかったが、これらの教材で扱った基本的な有機化合物の構造とその応用を扱うことで、技術的工学的な特徴を出すことができるであろう。今回示した教材は、使い方と作る分子を限定してあったが、特徴ある物性を持つ既知化合物からの類推により、新しい別な分子モデルの制作に結びつけることもひとつの方向性であろう。

引用文献

- 1) 日本理科教育学会, 『理科教育学講座』 6巻, 理科教材論 (上), 東洋館出版社, 1993, p. 10.
- 2) 日本理科教育学会, 『理科教育学講座』 6巻, 理科教材論 (上), 東洋館出版社, 1993, p. 11.
- 3) 西園芳信, 増井三夫, 『教育実践から捉える教員養成のための教科内容学研究』, 風間書房, 2009.
- 4) 上越教育大学, 『教科専門と教科教育を架橋する教育研究領域に関する調査研究』, 平成22-23年度文部科学省先導的の大学改革推進委託事業研究報告書, 2011, p. 31.
- 5) 胸組虎胤, 佐藤勝幸, 理科の教科内容―自然認識, 資質・能力, 日本教科内容学会誌, 第3巻, 2017, p. 90.
- 6) National Research Council, A Framework for K-12 Science Education: Practices, Crosscutting Concepts, and Core Ideas, 2012. (http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=13165&page=6).
- 7) Next Generation Science Standards: For States, By States, The National Academies Press, 2013. (<https://www.nextgenscience.org/>)
- 8) 文部科学省, 小学校学習指導要領解説 理科編 平成29年6月. (www.mext.go.jp/component/a_menu/education/micro_detail/1387017_5.pdf), 2017.
- 9) J. Bennett, F. Lubben, & S. Hogarth, Bringing Science to Life: A Synthesis of the Research Evidence on the Effects of Context-Based and STS Approaches to Science Teaching. *Science Education*, 91 (3), 2007, pp. 347-370.
- 10) 安東恭一郎, 金政孝, 韓国の STEAM 科学と芸術の融合による教育の可能性と課題-韓国 STEAM 教育の原理と実践場面の検討-, 美術教育学: 美術科教育学会誌, Vol. 35, 2014, pp. 61-77.
- 11) D. A. Sousa, T. Pilecki, From STEM To STEAM, Corwin, 2013. ; 同日本語翻訳版: 胸組虎胤訳, 『AI 時代を生きる子供のための STEAM 教育』, 幻冬舎, 2017.
- 12) 山崎貞登, 特集: 科学・技術 (Science and Technology), 科学教育研究, Vol. 39 (2), 2015, p. 55.
- 13) K. Jayarajah, R. M. Saat, R. A. A. Rauf, A review of science, technology, engineering & Mathematics (STEM) education research from 1999-2013: a Malaysian perspective, *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, Vol. 10, No. 3, 2014, pp. 155-163.
- 14) J. Brown, R. Brown, C. Merril, Science and technology educator's enacted curriculum: areas of possible collaboration for an integrative STEM approach in public schools. *Technology Teacher*, Vol. 71, No. 4, 2012, pp. 30-34.
- 15) P. R. Hernandez, R. Bodin, J. W. Elliott, B. Ibrahim, K. E. Rambo-Hernandez, T. W. Chen, M. A. de Miranda, Connecting the STEM dots: measuring the effect of an integrated engineering design intervention, *International Journal of Technol. Des Educ*, Vol. 24, 2014, pp. 107-120.
- 16) USA, Report of the Academic Competitiveness Council, 2007, p. 1.
- 17) 胸組虎胤, 非対称有機分子の立体化学の理解を助ける教材の研究, 高専教育, No. 17, 1994, pp. 21-26.
- 18) 胸組虎胤, 非対称有機分子の立体化学の理解を助ける教材の研究 (2), 高専教育, No. 18, 1995, pp. 17-21.
- 19) 胸組虎胤, 有機化学の理解を助ける教授法の研究, 高専教育, No. 18, 1995, pp. 22-26.
- 20) 胸組虎胤, TCA 回路を記憶し理解する方法に関する一研究, 高専教育, No. 19, 1996, pp. 188-194.
- 21) 胸組虎胤, 高速液体クロマトグラフィー分析の教材化の研究, 高専教育, No. 19, 1996, pp. 195-203.
- 22) 胸組虎胤, 物質工学科の学生実験における分子モデルの利用, 高専教育, No. 20, 1997, pp. 168-175.
- 23) 胸組虎胤, 物質工学科の学生実験における分子モデルの利用 (2), 高専教育, No. 21, 1998, pp. 199-203.

- 24) 胸組虎胤, 有機反応機構における矢印の意味に関する研究, 高専教育, No. 22, 1999, pp. 263–267.
- 25) 胸組虎胤, 分子モデルの組み立て実験と分子モデリングソフトとの連携, 高専教育, No. 22, 2000, pp. 177–182.
- 26) 胸組虎胤, 分子モデルの組み立て実験と分子モデリングソフトとの連携 (2), 高専教育, No. 23, pp. 193–198 (2001).
- 27) 胸組虎胤, 実験スケールのマイクロ化の利点と問題点, 高専教育, No. 24, 2002, pp. 205–208.
- 28) 胸組虎胤, 分子模型とモデリングソフト連携の立体化学教育法の構築, 工学教育, 50 (5), 2002, pp. 66–70.
- 29) 胸組虎胤, 佐々木いづみ, 浦田克郎, 生物工学関連学生実験のマイクロ化への考え方とその試み, 工学教育, 51 (1), 2003, pp. 90–94.
- 30) 胸組虎胤, 貼り付けパネルを用いた代謝経路の説明授業, 高専教育, No. 26, 2003, pp. 309–313.
- 31) 胸組虎胤, 用語の関連をつけさせる生物化学の授業, 高専教育, No. 26, 2003, pp. 315–319.
- 32) 胸組虎胤, 歯磨きを使って歯垢の成分を分解する, 化学と教育, 51 (4), 2003, pp. 238–239.
- 33) 胸組虎胤, 教育効果を高めるツールとしてのエピソード紹介, 高専教育, No. 27, 2005, pp. 489–494.
- 34) 胸組虎胤, 物質工学系の英語教育の目標と実践, 高専教育, No. 29, 2006, pp. 107–110.
- 35) 胸組虎胤, D-アミノ酸の所在, 働き, 理科教材, 鳴門教育大学研究紀要, 32巻, 2017, pp. 124–138.
- 36) 平山令明, 『Chem Sketch で書く簡単化学レポート—最新化学レポート作成ソフトの使い方入門』, 講談社, 2004.
- 37) 長野哲雄監訳, 『マクマリー生物化学反応機構』, 東京化学同人, 2007.
- 38) 柴崎正勝他訳, 『マクマリー有機化学—生体反応へのアプローチ』, 2009.
- 39) 田宮信雄他訳, 『ヴォート生物化学第4版』, 東京化学同人, 2012.

Development of Multidisciplinary Teaching Aids Related to Science – Possibility of Application in Classroom Practice

MUNEGUMI Toratane

(Keywords: Science, Interdiscipline, Teaching aid, Classroom practice,
Higher education, elementary and secondary education)

Multidisciplinary teaching aids related to science may be needed to progress the science education in the new era. Science education has been developed in the viewpoints of their disciplinary components: physics, chemistry, biology, and geology. The author had investigated the multidisciplinary teaching aids used for the students of a chemistry department in a college of technology in Japan. This research addresses the practical use of the teaching aids for wide grades of students and the extraction of some multidisciplinary essence from the teaching aids. Especially, the teaching aids related to organic chemistry and enzymatic reactions showed chemical, biological, mathematical, and artistic components.