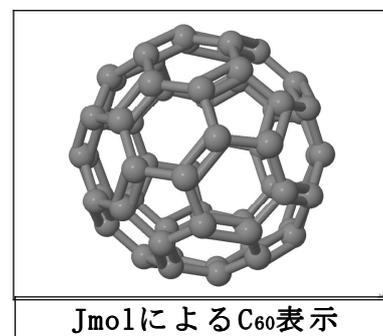


炭素の同素体 C₆₀フラーレン模型作成

岩見沢農業高等学校 SS理科担当
高木伸雄(時間講師)
中村諒生(理科教諭)
渡井陽子(実習助手)

炭素の同素体にはダイヤモンド、黒鉛が知られていたが、1985年に黒鉛にレーザーを照射したときに発生する蒸気の中に、新しい炭素同素体が発見された。フラーレンとよばれるこの同素体のうち、バックミンスターフラーレンC₆₀がもっとも有名である。ほかにも炭素数の多いフラーレン類があるが、その形は、最初に発見された、サッカーボール型のバックミンスターフラーレンを、ひきのばしたような形をしている。



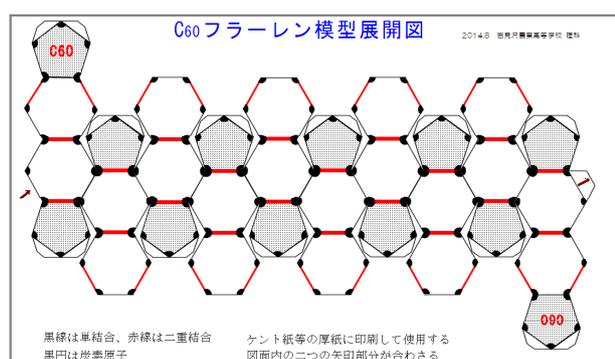
私たちは、化学基礎の授業の中で同素体の一つとしてこのフラーレンを取り上げ、実験実習の授業時間に模型を作成させた。

授業の流れ

1時間の授業の中で、前半はフラーレンの説明と模型作成、後半は硫黄の同素体の比較として単斜硫黄を作る実験及び事前に作っておいた斜方硫黄の観察を行った。

このレポートはC₆₀フラーレンの模型展開図作成及び授業中の生徒の作業手順を示す。

模型展開図はジャストシステムのソフトウェア「花子10」を使って作成した。



C₆₀フラーレン模型展開図 (A4サイズ)



展開図を組み立てた模型

C₆₀模型展開図はケント紙などの厚めの紙に印刷し、切り抜いて組み立てていく。最初あまり上手く行かなかったが、幾度か作り直し改良した結果、実際に使えるものができた。特徴は以下の3点である。

- ①炭素原子を黒い円で表示した
- ②二重結合を太い赤線で示した (補足2参照)
- ③のりしろは一部のみにして短時間でサッカーボール状になるようにした

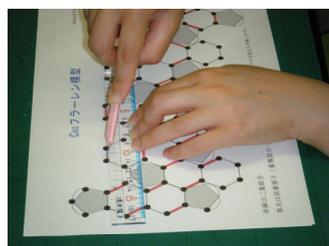
模型展開図の作成過程において、実習助手が生徒の目線で見ると不都合な点や操作し

にくい点などを指摘し教諭が改良していくという過程を取った。例えば、当初は組み立てた模型の上に、各炭素原子から1本ずつ二重結合が出るように色を付ける作業を考えたが、実際にやってみると難しく、時間も随分取られることが分かったので、最初から二重結合の部分には赤線を入れることにした。この模型展開図は実習助手と担当教諭の協力によってできたものである。さらに、このレポート作成過程において、いくつかの重要な指摘を同僚の五十嵐康二教諭から頂き、よりよいものになった。

《作業》

- ①今回は授業時間の半分ほどを模型作りに使うために、模型展開図を事前に切り出しておいた。1枚の作業に、折り目を入れることを含めて40分程かかる。
(概略の形を作るのであれば、はさみで大胆に切っていくと時間が短縮できる)
この展開図を4人一組の各班に配布する。
- ②展開図を折れ線に沿って軽く曲げる。
- ③一度平らにして、全てののりしろにテープのりをつける。
(セメダイン等ののりを使って一つずつのり付けしていてもかまわない)
- ④のりしろの部分で強く押さえながら組み立てていく。
- ⑤のりしろが上手くつかない等の場合は上からセロハンテープで貼る。
(のりしろをとらないで、セロハンテープでつけていくと時間は短縮できる)
- ⑥組み立てが最後の方になると、指が入りにくくなるので、ボールペン等を使ってのりしろを押さえっていく。
- ⑦完成したら、各面の頂点にある黒点(炭素原子)から伸びている単結合(黒線)が2本、二重結合(赤線)が1本、合計4本の「結合の腕」が出ていることを確認する。

以下の写真は上記の文章に対応したものである。



①



②



③



④



⑤



⑥



⑦



生徒の様子

模型展開図(花子ファイルとPDFファイル)をダウンロード可能にしてあるので、自由に使用してほしい。花子を使うとのりしろを増やす、色を付ける等の変更を自由に行うことができる。花子は矢印キーの操作で図形を0.1mm単位で移動するように設定できる。細かな作業をするときには設定を変えるとよいと思う。

補足 1

講談社で出版しているブルーバックス「動く分子事典」という本についているフリーソフトウェアJmolは分子の構造を3次元で表示させたり、回転させて表示させることができる非常に素晴らしいものである（現在は、より新しいバージョンのものをダウンロードして使うことができる）。この授業の前に1時間使ってコンピュータ教室で一人一人の生徒に基本的な分子の構造について操作・表示をさせているので、今回の授業ではこのJmolによりフラレンを表示して分子の姿を見せることができた。

補足 2

授業では、ダイヤモンドの写真と黒鉛の写真を見せた。学校にある黒鉛の固まりを紙の上にこすると、線が書ける部分と書けない部分があることを示した。さらに、これらの原子の並び方を写真で示し、黒鉛が何故鉛筆のように線がかけるかを説明した。さらに、炭素が共有結合して出来ている一つの層が円形になったものがカーボンナノチューブ、その端をふさぐためには炭素原子5つが結合した五員環が必要であることを画像も使いながら示した。フラレンには炭素原子数が20、60、70、100など色々あるがどれも五員環は12個になっている（炭素数20の分子は非常に不安定である）。

これらの炭素原子の結合は、電子のSP²混成軌道による σ 結合が3本（これらは同一平面上にある）と2P軌道による π 結合が1本になっている。従って、本来これらの炭素の共有結合は同一平面上に存在すると安定になる。カーボンナノチューブやフラレンのように湾曲すると少し無理がかかることになる。生徒には簡単な性質を話したが、物質の性質をこのような結合から解き明かしていくのは大変興味深いことである。なお、上記の σ 結合は結合する炭素原子は決まっている（局在化している）が、 π 結合は周りのいくつかの炭素原子間で結合している（非局在化している）ため、二重結合の表示は便宜的なものである。

補足 3

フラレンFullereneについて（Microsoftエンカルタ総合大百科2003より抜粋）
60個の炭素原子からなる化学式C₆₀の分子。形はほぼ球状で、サッカーボールの表面にある20個の六角形と、12個の五角形の頂点に、炭素原子が位置している分子と考えるとわかりやすい。この炭素同素体の構造が、アメリカの建築家バックミンスター・フラが考案した幾何学的構造に似ていることから、バックミンスターフラレンとよばれるようになった。

炭素の同素体としては長い間、ダイヤモンド、黒鉛、および不定型炭素の3種しか知られていなかった。これら同素体の炭素原子の配列は、おのおの異なるため、その性質もちがう。しかし、1985年に黒鉛にレーザーを照射したときに発生する蒸気の中に、新しい炭素同素体が発見された。フラレンとよばれるこの同素体のうち、バックミンスターフラレンがもっとも有名である。ほかにも炭素数の多いフラレン類があるが、その形は、最初に発見された、サッカーボール型のバックミンスターフラレンをひきのばしたような形をしている。

バックミンスターフラレンは黒鉛にレーザーを照射してつくられたのが最初であるが、その量はきわめて少なかった。その後すぐに、ヘリウムガスの存在下で2つの炭素棒の間にアーク放電をおこさせると大量に生ずることがわかった。今ではローソクの炎などの煤の中にこのバックミンスターフラレンが存在していることもわかつ

ている。

フラーレン分子を利用しようとして多くの研究がおこなわれている。この分子のしめすひとつの重要な性質は、炭素原子でできた中空の球であるフラーレン分子が、その中にほかの原子をつつみこむというものである。また、管状フラーレンの中に金属原子をいれると絶縁体の電線となる。もうひとつの重要な性質は、バックミンスターフラーレンがその中に物質をとりこんだもの、たとえば、カリウムKをとりこんだ K_3C_{60} などがしめす低温超伝導現象である。タリウムとルビジウムイオンをとりこんだフラーレンは -228°C で超伝導をしめす。この温度は、ほかの超伝導物質がこの現象をしめす温度より比較的高い。癌細胞を攻撃するバックミンスターフラーレン由来の物質もある。この物質は酵素の活性部位に入りこみ、酵素活性をおさえると考えられる。

2001年10月、ロシアのヨッフエ物理技術研究所のグループが、フラーレンだけで磁石をつくることに成功した。金属をまったくふくんでいない炭素だけのフラーレンが磁力をもつことは従来の考え方だけでは説明できないが、プラスチックなどの有機物だけで磁石をつくれる可能性が出てきた。磁石となるには原子核の周囲をまわる電子の向きがそろうことが必要となるが、このフラーレンの場合も外部からの磁力により、フラーレン同士が結合した部分の電子の向きがそろうためではないかと考えられている。

補足 4

C_{60} 模型展開図がうまく出来たので、ついでに高次フラーレンの模型展開図を作り、組み立ててみた。模型展開図を見てわかるように、どのフラーレンも五員環6個、六員環10個が片方にあり、反対側にも同じものがあるという構造になっている。その間に5の倍数の六員環が挟まっている。すなわち、 C_{60} では六員環なし、 C_{70} では六員環5個、 C_{80} では六員環10個等となっている。わかりやすいように展開図には色を付けて区別してある。理科部等で生徒に考えさせたり、研究させるとおもしろいと思う。

どのフラーレンも五員環は12個になっている。これはフラーレンのような多面体に関する幾何学の定理「オイラーの多面体定理」から12個以外は存在しないことが導かれる。この定理の示すところは多面体に関して、頂点の数－辺の数＋面の数＝2 という簡単な式である。（ C_{60} では、頂点の数－辺の数＋面の数＝ $60-90+32=2$ となる）

フラーレンについて計算してみる。五員環の数をX、六員環の数をYとする。各頂点は3つの面が合わさっているので、頂点は各面に3分の1が割り当てられる。また、各辺は2つの面が合わさっているので、辺は各面に2分の1が割り当てられる。従って、

上記の定理 頂点の数－辺の数＋面の数＝2 に代入すると

$$(5X + 6Y)/3 - (5X + 6Y)/2 + X + Y = 2$$

これを解くと、 $X = 12$ となる。

すなわち、六員環の数に関係なく（上記の式を解くとYがなくなる）、五員環は常に12個ということになる。

また、五員環は隣接しないという構造をとる。これは幾何学的な要請ではなく、経験則である。六員環に比べて五員環は炭素原子同士の結合に無理がかかっているため、隣接すると化学的に不安定な物質になるからである。

以下に4つのフラーレンの模型と展開図を示す。炭素原子を示す黒円と二重結合を示す赤線は入れてない。

C_{60}

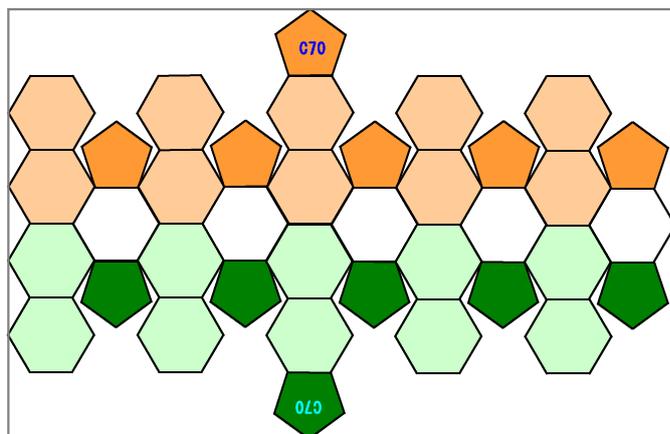
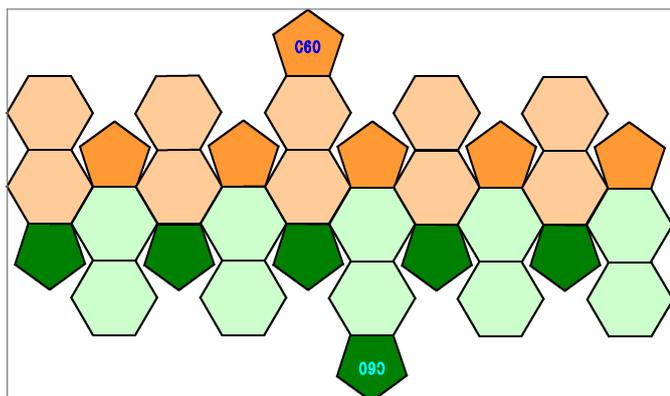


五員環12
六員環20

C_{70}



五員環12
六員環25



C_{80}

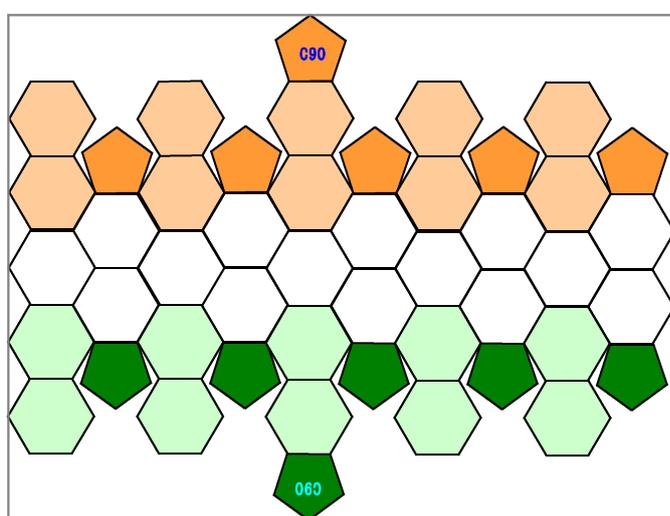
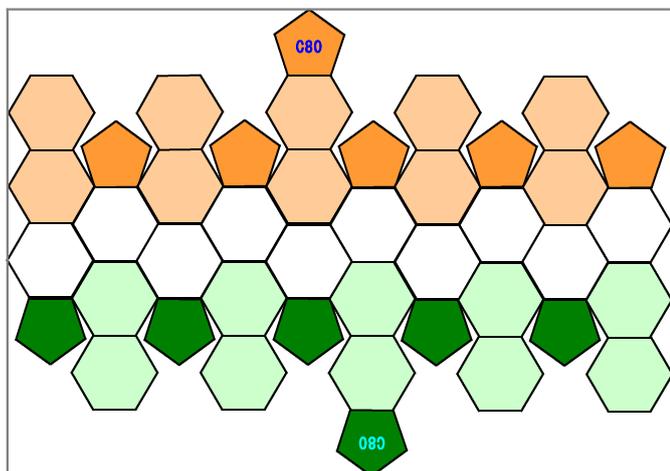


五員環12
六員環30

C_{90}

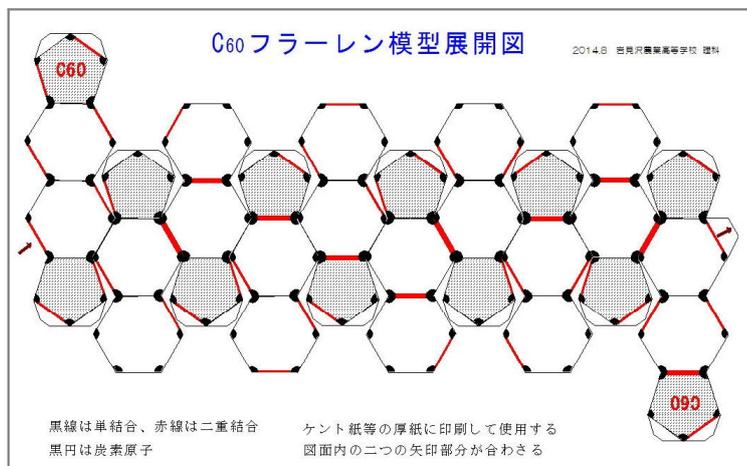


五員環12
六員環35



補足 5

1 頁目に示したC₆₀フラーレンの模型展開図中の赤線（二重結合）の位置は、規則的な形をしておりわかりやすいが、展開図の中に入れる二重結合の位置（組み合わせ）は何通りもある。以下にその一つの例を示す。



C₆₀フラーレン模型展開図（A4サイズ）

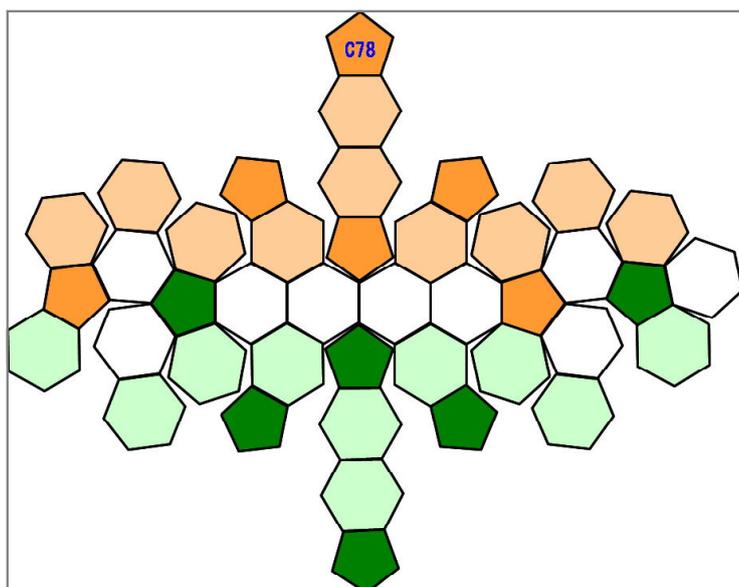


展開図を組み立てた模型

補足 6

補足 4 のフラーレンは炭素原子が60から順次10ずつ増えていく（六員環が5個ずつ増えていく）ものを表示したが、例えば炭素原子数が74、82等さまざまなものが発見されているようである。しかしこれらの展開図を作るのは結構難しい。以下に、C₇₈の展開図とそれを組み立てた模型を示す。C₈₀ と比べると六員環が一つ少ない、すなわち炭素原子が二つ少ないだけであるが、五員環・六員環の配置や全体の形がかなり違うことがわかる。

C₇₈



C₇₈フラーレン模型展開図



五員環 12
六員環 29

展開図を組み立てた模型