

フラーレン C_{60} モデルとセパタクロール

西山 豊

概要：この論文の前半は、6色のPPカラーバンドでセパタクロールを作成するならば異なるボールのパターンは何通りできるかという問題を解いている。ここではキラルが重要なポイントとなる。後半は、セパタクロールと同じ切頂20面体の構造をもつフラーレン C_{60} を、60個の炭素原子の配置、そして単結合と二重結合について、数学の視点から考察している。

キーワード：フラーレン C_{60} , 切頂20面体, セパタクロール, キラル, 単結合, 二重結合

1. 編み方に二通り

2013年10月のある日、アメリカのR. L. ウェッテン (Prof. Robert L. Whetten) という人からメールが送られてきた。このメールには、金属ハロゲン化物に関する論文のPDFファイルが添付されていて、私の論文を引用させていただいたと謝辞があった [1]。私は化学とは無縁であるので、このメールは何かの間違いではないかと思った。

添付ファイルの論文をなんとなく眺めていると、この論文の図4(d)に、テキサスの芝生の上に置かれたセパタクロールの写真が目にとまった。私は以前にセパタクロールに関する論文をまとめたことがあるが [3]、この化学物質と何か関係があるのだろうか。論文には金原子が144個、塩素原子が60個でできる化学物質 $I-Au_{144}Cl_{60}$ の構造を示すモデルとしてセパタクロールを用いたとある。

写真にはボールが3個並べてある。真ん中に競技用でプラスチック製の大きめのボールがあり、その両側には6色の紙製の帯で作られた小さめのボールが2個ある。紙製のボールは1個でよいのになぜ2個なのだろうか。紙製のものをよく見ると微妙に違う。6色の色の順序は同じであるが、帯の重なり方(編み方)が違っていた(後述)。化学ではこれをキラルと呼んでいる。

察するに、この金属ハロゲン化物 $I-Au_{144}Cl_{60}$ はフラーレン C_{60} と同類の構造を持つようである。私は、メールを受け取った頃、ある数学雑誌の編集部から出題を依頼されていて、問題作りに四苦八苦していた。アメリカ・テキサスからのメールをヒントにして、面白い問題ができたので、それを雑誌に投稿した [4]。

2. 6色のバンドで異なるセパタクロールが何通りできるか

[出題]

荷造り用のPPバンド(ポリプロピレン製の帯)を6本集めてセパタクロールを作る

ことができます。この6本の帯の色がすべて異なるとき、異なるパターンのセパタクロールボールが何通りできるでしょうか(図1)。

(注)セパタクロールは東南アジアの球技であり、使用するボールは切頂20面体(準正32面体)の形をしています。3本の帯はすべての箇所ですくみの関係になっていてほどこけず、各帯は大圏コース(大円)を通ります。空洞部分は正五角形の形をしています。



図1. セパタクロールボール(6色の帯)

[解答および講評]

応募者は20代から80代までの45名で、答えを12通りとしたものが14名(31%)、24通りとしたものが20名(45%)、48通りとしたものが6名(13%)、その他が5名(11%)であった。12通りか、24通りか、48通りかの三択問題のようになったが、24通りが正解である。12通りとした答えはバンドの重なり方に2種類あるのに(キラルに)気づかず、48通りとした答えは北極と南極では色の順序が逆回りになっていることに気づかなかったものであり、どちらも気づかず答えが偶然24通りになったという答えはなかった。

6色のバンドであるから、

$$6! = 720 \text{ 通り}$$

となるのではないかと思ったが、解いてみて意外と少なかったという感想が多かった。また、競技用セパタクロールの公式球は出題の写真と重なり方(編み方)が逆になっているという指摘もあったが、バンドの重なり方に関係なく両方ともセパタクロールボールとしてあつかうことにした。

解答のためにはセパタクロールボールの作成法が重要であるので、それを説明しておこう。

幅が15mm、長さが56cm(2周分の長さ)のポリプロピレン製のバンド(PPバンド)を6本用意しておく。セパタクロールボールは

- (1) 3本のバンドを三すくみにすること
- (2) 5本のバンドで正五角形を作ること

という2つの規則を守れば自然と出来上がる[3]。正五角形が12個、正六角形が20個できるので、サッカーボールと同じ切頂20面体となる。図2では空洞(黒色)が正五角形、バンドの重なった箇所に点線を描くと正六角形となる。このボールを作成したことの無い読者は是非とも作ってみてください。セパタクロールボールが図2の状態から完全なボールになっていく過程は、コランニユレン $C_{20}H_{10}$ からフラレン C_{60} が形成されていく過程とよく似ている(後述)。

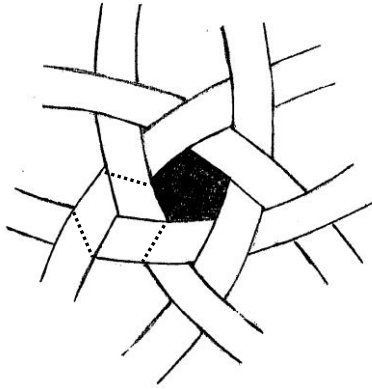


図2. 空洞が正五角形，帯を点線で囲むと正六角形

6本のPPバンドでセパタクロールを作れるとしたが，この6本は正20面体の6つの大円と関係がある(図3)。正20面体は20個の正三角形からできているが，面(F)が20個，辺(E)が30個，頂点(V)が12個である。オイラーの多面体定理によると

$$F - E + V = 20 - 30 + 12 = 2$$

となる。正20面体の軸に直交する平面で，正20面体を2分割すると，その断面上に大円ができるが，この大円の数6個ある[5]。この6個の大円に沿ってPPバンドで編んでいけばセパタクロールができあがる(図1)。

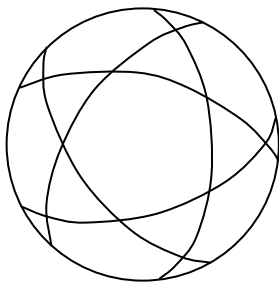


図3. 正20面体の6つの大円[5]

以上説明したように，セパタクロールには正五角形が12個できる。ボールを地球に見立てて赤道，北極，南極といった言葉を用いることにする。また，バンドの色をAからFとする。

1つの正五角形(北極)に注目し，その正五角形をPとする。Pの5つの辺は5色のバンドで構成され，6色目のバンドは，対称性よりPの中心と球の中心を通る直線に垂直な大円(赤道)となる。このバンドの色をAと固定して考える。

Pの5辺を構成する残りB~Fのバンドの組合せは，円順列により

$$(5 - 1)! = 4! = 24通り$$

となる。

ここで、P（北極）のバンドの色の順序を反時計まわりにB, C, D, E, Fとする。Pの真裏（南極）の正五角形の配置は北極と比べて上下反転するとともに、色の順序が逆まわり（時計まわりにB, C, D, E, F）になっている（図4）。これは図3に示した正20面体の6つの大円の位置関係からも明らかである。よって、24通りとしたが、ある配置とその逆回りを重複して数えているので、2で割って

$$24 \div 2 = 12 \text{通り}$$

となる。

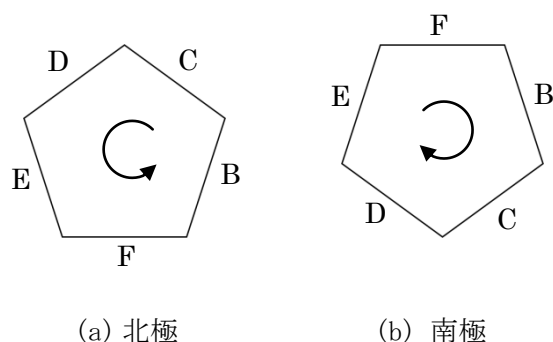


図4. 北極と南極では色の順序が逆回り

また、バンドの三すくみに注目すると、バンドを下から上に編んでいくとすれば、右まわり（時計まわり）と左回り（反時計まわり）の2種類があることがわかる（図5の(a)と(b)）。そこで、上の値を2倍して

$$12 \times 2 = 24 \text{通り}$$

となり、これが最終的な答えとなる。(a)と(b)はキラル（対掌体、鏡像異性体）の関係である。

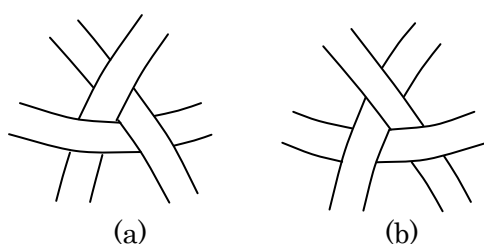


図5. 三すくみに2種類

以上の考察を踏まえて、セパタクロールを実際に作ってみるとつぎのようになる。まず、バンドの重なり方に2種類あるので、色の順番が同じであってもボールが2種類できる（図6）。また、バンドの重なり方をどちらか一方に決めた場合、色の組合せだけで考えると12通りのボールとなる（図7）。



図 6. バンドの重なり方に 2 種類



図 7. 色の組み合わせだけでは 12 通り

ここで、切頂 20 面体とサッカーボール、セパタクロールボールの関係を考えてみよう。切頂 20 面体は正 20 面体の頂点を切り落としたもので、正五角形が 12 個、正六角形が 20 個の合計 32 個の面からできている。そして頂点の数は 60 個である (図 8 (a))。正五角形と正六角形の面を放射状に膨らませて球面にしたのがサッカーボールである (図 8 (b))。この場合、頂点の座標は変化しない。正 20 面体の 6 個の大円に沿って帯を編んだのがセパタクロールボールであり、空洞の正五角形の頂点が切頂 20 面体の頂点に対応する (図 8 (c))。ただし、競技用の公式球より PP バンドで作成したものの方が正五角形の頂点の位置が正確である (図 1)。

フラーレン C_{60} の分子モデルとして、サッカーボールがよく例にされるが、身近なもので切頂 20 面体を表現するには、セパタクロールボールの方が適しているように私は思える。セパタクロールボールは 6 本の PP バンドがあれば容易に作成できるし、正五角形が空洞になっているので内部がよく見え、この中に金属原子を埋め込めば、金属内包フラーレンを連想させる。三すくみの結合 (編み方) によりボールをより強固にしているし、PP バンドの幅がボールの大きさ (直径) を決めるなどのすぐれた性質がある [3]。

セパタクロールボールの魅力にとらわれると、PP バンドの経路が電子軌道に見えてくることがある。フラーレン C_{60} の最外殻にある 120 個 ($12 \times 5 + 30 \times 2 = 120$) の自由電子は、このような軌道上で運動しているのではないかと期待するが、この仮説には無理があ

るようだ。



図 8. 切頂 20 面体の仲間

また、つぎのような性質もある。PP バンドが重なる箇所は合計 30 ヶ所ある。この箇所
に図 9 のように二重線を書きこむと、フラレン C₆₀ の炭素結合モデル（二重結合と単結
合によるケクレ構造）となる（図 12(a)）。



図 9. バンドの重なりに二重線を引く

3. フラレン C₆₀ の分子構造モデル

1985 年, H. W. クロトーらによってサッカーボール型の炭素分子 C₆₀ が発見された [6]。この分子は、発見のヒントとなった建築家バックミンスター・フラワーの名前を引用してバックミンスターフラレンと名づけられた。そして 1996 年, H. W. クロトー, R. F. カー
ル, R. E. スモーリーの三人はノーベル化学賞を受賞している。ただし、この分子の可能性は 1970 年, 大澤映二 によって予言されていた[10]。

1985 年の発表当時から、私は 60 個の炭素原子がどのように配置しているのかに、関心
があった。それというのは、私の研究に生物進化における 5 の謎の解明があったからだ。
花卉はなぜ 5 枚が多いのだろうか、ヒトデの腕はなぜ 5 本か、ヒトの指はなぜ 5 本かなど
を考えると、自然界には 5 が潜んでいるように思える。そして、私は、発生生物学におけ
る卵割の 32 細胞期や、花芽形成期における茎頂の細胞配置を切頂 20 面体でモデル化して
いた[2]。

初期発生における卵割の 32 細胞期の細胞配置は、フラレン C₆₀ と構造が似ている。ど
ちらも切頂 20 面体に関係している。切頂 20 面体は頂点が 60 個、面が 32 個、辺が 90 個
であるが、60 個の頂点に炭素原子を配置すればフラレン C₆₀ になり、32 個の面に卵割細
胞を配置すればヒトデ卵の 32 細胞期になる。

切頂 20 面体は球にかなり近いとされながらも、60 個の頂点の位置は完全に均一ではない。正五角形の大きさは正六角形より小さい。均一であるならば正五角形はやや大きめ、正六角形はやや小さめになるのではないだろうか。そして 60 個の炭素原子が球表面にどのような配置になるのだろうか。これは興味がそそられるところである。さらに、 C_{60} には最外殻電子、原子価といった化学特有の問題があり、生物学における細胞の配置と同列に扱うことができないことも事実だ。

C_{60} の分子構造を詳しく知る方法はないかと模索しているとき、冒頭の R. L. ウェッテン氏から化学構造が立体的に見られるフリーソフト Jmol を教えていただいた。Jmol の PC へのインストールはそれほど難しくなかった。そして、インターネットに公開されているフラーレン C_{60} のデータ (ファイル名: C60.xyz) を用いて、 C_{60} を表示してみると図 10 のようになった。Jmol は、マウスを使いながら C_{60} を回転させて見るできるので、 C_{60} 分子の三次元空間でのイメージがつかめやすい。

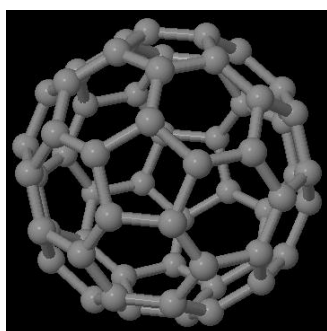


図 10. Jmol で表示した C_{60}

私は、C60.xyz のデータの中身に興味が移った。データは全部で 62 行あった。1 行目は 60 とあるので、分子を構成する原子の数が記入されているのであろう。2 行目はタイトル行であろう。空白のままでもよいことがわかった。3 行目から 62 行目までは同じ形式で、先頭カラムが C で、その後に空白を挟んで数値が 3 つずつある。先頭の C は炭素原子の C であろう。つづく 3 つの数値は x 座標、y 座標、z 座標であろう。ファイルの識別子は xyz でファイル名は C60.xyz のようになっていた。その記入例を以下に示しておく。

(Jmol データの例 C60.xyz)

60

Buckminsterfullerene C60 model

C -1.415441 3.015027 -1.167954

C 2.583693 2.292084 -0.721147

C 0.721155 -2.583700 2.292090

.....

炭素原子 (C) の座標データだけでよいのだろうか。一般に、立体図形を表示するには頂点の座標だけでなく、各面を構成する辺の情報、各辺を構成する点の情報が必要である。

五員環や六員環を構成する炭素番号や、どの炭素とどの炭素が結合しているのかの情報が必要ではないかと不思議であるが、Jmol システムでは、60 個の座標データだけから、面の情報、辺の情報をプログラムが計算しているようである。

インターネットに公開されている幾つかの Jmol ファイル(C60.xyz)を用いて、分子モデルを表示するとともに、炭素原子の位置関係について調査した。立体図形の理解を助けるために図 11 のようなネットワーク図を作成した。(a)は灰色が五員環、白色が六員環であり、黒丸が炭素原子である。(b)は炭素原子に番号をふり、結合の関係をわかりやすくしたものである。

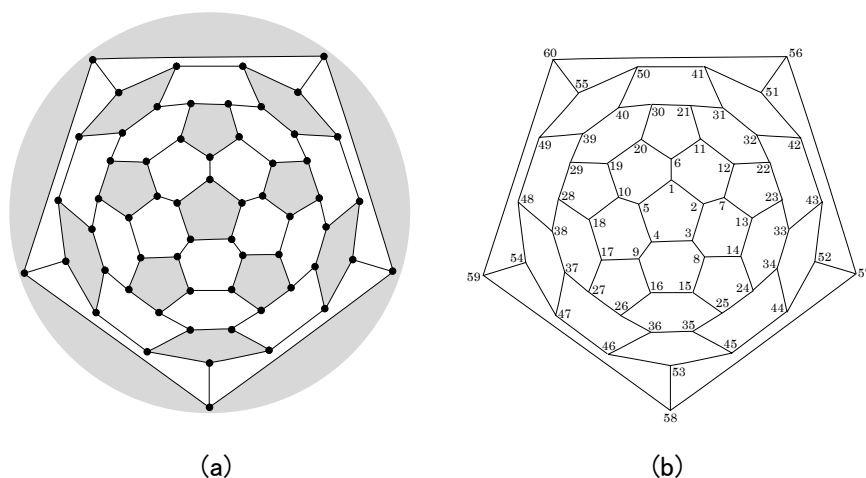


図 11. ネットワーク図

C60.xyz の座標を、

$$\{(C_i(x), C_i(y), C_i(z)), i = 1, \dots, 60\}$$

とする。60 個の x 座標, y 座標, z 座標の平均をとり, $O(x_0, y_0, z_0)$ とすると, これは C_{60} の中心 (重心) となる。

$$x_0 = \frac{1}{60} \sum_{i=1}^{60} C_i(x), \quad y_0 = \frac{1}{60} \sum_{i=1}^{60} C_i(y), \quad z_0 = \frac{1}{60} \sum_{i=1}^{60} C_i(z),$$

そして, 中心 O から頂点 C_i までの距離 (半径) を r_i とすると

$$r_i = \sqrt{(C_i(x) - x_0)^2 + (C_i(y) - y_0)^2 + (C_i(z) - z_0)^2}$$

となり, これで 60 個の半径が計算できる。

また, 炭素 C_i と炭素 C_j の距離を $l_{i,j}$ とすると

$$l_{i,j} = \sqrt{(C_i(x) - C_j(x))^2 + (C_i(y) - C_j(y))^2 + (C_i(z) - C_j(z))^2}$$

となり, これで 90 個の炭素間の距離が計算できる。

また, 平面の方程式 ($ax + by + cz + d = 0$) を用いて, 五員環の 5 つの炭素原子や, 六員環の 6 つの炭素原子が同一平面上にあるかどうかを調べることもできる。表計算ソフトで実際に計算してみると, 五員環や六員環が同一平面上にこなくて, ねじれているものもあ

った。これは炭素 C_i の中心 O からの距離 r_i のばらつきからも想像がつく。

半径 r_i のばらつき，炭素間の距離 $l_{i,j}$ のばらつき，五員環や六員環のねじれは一体どこからくるのだろうか。測定による誤差なのだろうか，計算による誤差なのだろうか。それとも誤差ではなくばらつきのあることが真であり，60 個の炭素原子はばらつきのある状態で C_{60} 分子の安定性が保たれているのだろうか。

切頂 20 面体は，辺の長さはすべて同じであり，中心から各頂点までの距離はすべて等しく，60 個の頂点は同一球面上に並んでいる。辺の長さを a とすると外接円の半径 r は

$$r = \frac{a}{4} \sqrt{58 + 18\sqrt{5}} \approx 2.4780a$$

となる。

フラーレン C_{60} と切頂 20 面体（サッカーボール）とは厳密には違うようである。

私は，Jmol システムで分子構造を眺めるだけではなく，実際に分子モデルキットを使って C_{60} を作ってみたくなった。市販されているキットはほとんどが炭素原子と結合手だけで単結合と二重結合の区別がない。電子の非局在性が現代化学の主流であっても，化学に特有な単結合と二重結合の概念は依然として存在するはずだと思い，探し出したのが MOL-TALOU（モル・タロウ）という分子モデルキットであった。販売は株式会社タロウでホームページはつぎである。<http://www.talous-world.com/> このキットは単結合と二重結合の区別があった。分子モデルを作成するのは，私にとって生まれて初めての作業であった。

4. 単結合と二重結合

C_{60} 分子の初めての X 線構造解析は，1991 年に J.M. ホーキンスらによって行われた。 C_{60} 結晶中の各 C_{60} 分子は常温で高速に回転しているために X 線構造解析は困難であった。ホーキンスらは C_{60} と四酸化オスミウム OsO_4 とを反応させて C_{60} の付加物 $C_{60}(OsO_4)(4\text{-}tert\text{-butylpyridine})_2$ を合成した。この C_{60} 付加物は結晶中では回転が止まり，結晶が乱れない構造をとるため X 線での構造解析が可能となった。これにより， C_{60} 分子のすべての炭素原子の位置が確定した。そして， C_{60} 分子の炭素—炭素間の距離には二種類あり，六員環と六員環が接する炭素—炭素間の平均距離は 0.1388(9) nm であり，六員環と五員環が接する炭素—炭素間の平均距離は 0.1432(5) nm であった[7][9]。

炭素—炭素間の距離については，同じ 1991 年に W. F. デービッドらが，六員環と六員環が接する炭素間の距離は，0.1391 (18) nm，六員環と五員環が接する炭素間の距離は，0.1455 (12) nm という値を報告している [8]。どちらも五員環の平均距離の方が，六員環の平均距離より 0.005 nm ほど長いということになる。このことは，五員環の炭素間は単結合のみで，六員環の炭素間は単結合と二重結合の混合であることを示唆している。ただし，二重結合は単結合に比べて電子密度が高く，炭素間の結合距離が短いとする。

インターネット百科事典ウィキペディアの項目でバックミンスターフラーレンを調べて

みると、フラーレン C_{60} の分子モデルが国（言語）ごとに微妙に違い、つぎの3つのタイプがある（図12）。

- (a) 単結合と二重結合の区別があり、五員環はすべて単結合、六員環はベンゼン環のように単結合と二重結合がひとつおきにある。
- (b) 単結合と二重結合の区別があるが、二重結合の場所が五員環と六員環の両方にまたがり、配置に規則性がない。
- (c) 単結合と二重結合の区別がなく、炭素原子の位置関係だけを示している。

この3つのタイプを国（言語）別にみると、(a)を用いているのはイギリス、ポーランド、中国、(b)を用いているのはスペイン、日本、イラン、インドネシア、オランダ、スウェーデン、(c)を用いているのはフランス、デンマーク、韓国、イタリアなどがある。

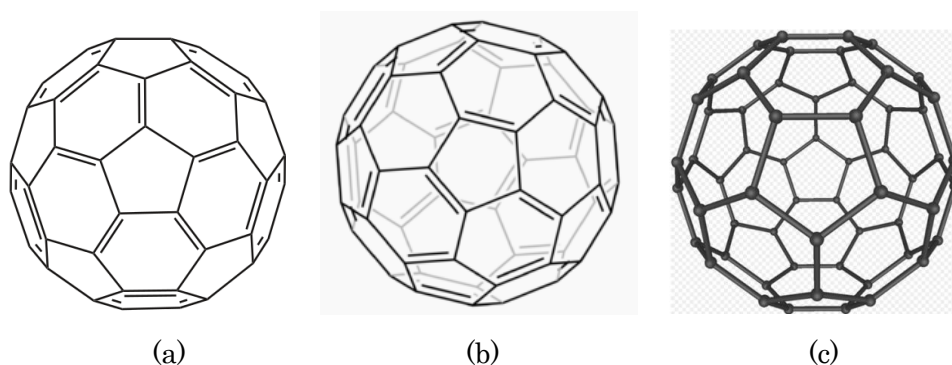


図12. フラーレン C_{60} の3つの表現（ウィキペディアより）

図12の3つの表現はどちらも一長一短である。そこで、電子密度を表現したものに図13がある。これは同じくウィキペディアに掲載されたもので、基底状態電子密度の等密度面というもので、密度汎関数法により計算されている。この表現は単結合と二重結合という方法を使わず、図12(c)のモデルに最外殻電子を追加して、電子雲のように表現したモデルとなっている。これらは量子化学という分野で説明されているようだ。

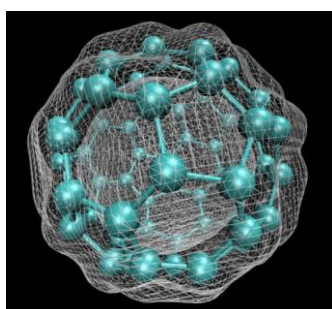


図13. C_{60} の電子密度の等密度面（ウィキペディアより）

炭素原子の原子価は4である。つまり、炭素原子から出ている結合の手は4本ということになる。フラーレン C_{60} の60個のすべての炭素原子は3個の炭素原子と結合している。炭素原子3個に対する結合の手が4本であるから、3個のうちどれかが二重結合となり、

それを描くと図 14 となる。○は炭素原子，1 本線は単結合，2 本線は二重結合を表している。単結合には自由電子が 1 個，二重結合には自由電子が 2 個という勘定になる。

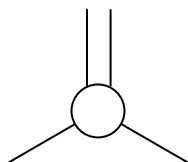


図 14. 2つの単結合と1つの二重結合

さて，フラーレン C_{60} のモデルで図 12(a)では，五員環はすべて単結合，六員環は単結合と二重結合がひとつおきであると説明したが，電子の非局在性を主張するならば，このような組合せに限定することには無理がある。ベンゼン環の表記がいろいろな変遷を経ていることでもあきらかである。そこで，五員環と六員環について起こりうるあらゆるパターンを列挙してみると図 15 と図 16 になる。

まず，五員環の 5 つの炭素原子をむすぶ結合が，すべて単結合である 5a，1 つだけ二重結合である 5b，2 つが二重結合である 5c の 3 つの可能性が考えられる。これ以外は存在しない (図 15)。

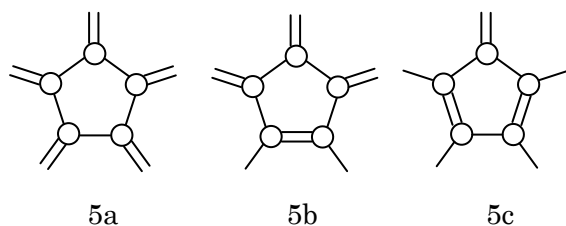


図 15. 五員環での 3 つの可能性

つぎに六員環であるが，六員環の 6 つの炭素原子をむすぶ結合が，単結合と二重結合が 3 つずつでひとつおきの 6a，二重結合の数をひとつ減らして 2 つとしたパターンには 6b と 6c，さらにひとつ減らして 1 つとした 6d，二重結合の数をゼロとした 6e の 5 つの可能性が考えられる。五員環，六員環ともに外に向かう結合手は，図 14 にしたがって結合手の本数も変わっている。

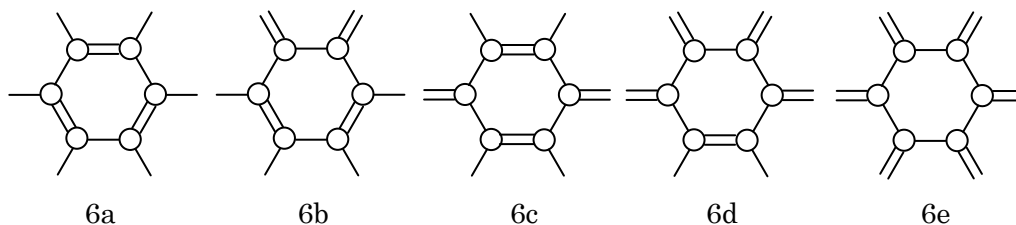
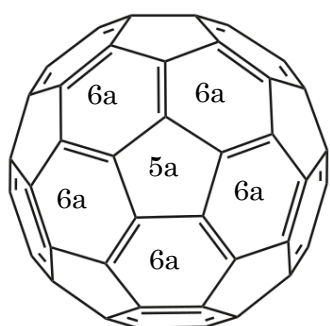


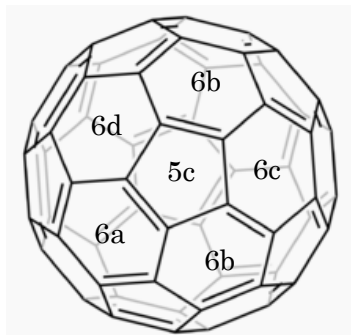
図 16. 六員環での 5 つの可能性

図 12 の(a)と(b)について，五員環と六員環の分類記号 (図 15，図 16) を記入すると図

17 となる。タイプ(a)は、五員環が 5a だけであり、六員環が 6a だけである。そして 5a と 6a が規則正しく配置されている。一方、タイプ(b)は、五員環が 5c, 六員環が 6a, 6b, 6c, 6d などさまざまである。



(a) 5a と 6a のみ



(b) さまざま

図 17. パターンの種類を記入する

タイプ(a)の規則性とタイプ(b)の不規則性は、一見して無関係のように思えるが、ある操作をほどこせば両タイプは同一となり、両タイプ間で移行が可能なることも説明できる (図 18)。たとえば、タイプ(a)において中央に六員環の 6a をもってくると、その周囲に反時計まわりに五員環の 5a と六員環の 6a がひとつおきに配置する (図 18(a))。六員環の 6a は外に向かう 6 本の手はすべて単結合であるので、この六員環を回転させても、周囲の五員環と六員環の結合に影響を与えない。そこで中央の六員環 6a だけを反時計まわりに 60 度回転させると図 18(b)となる。中央の六員環は 6a のままであるが、周囲の五員環は 5a から 5b に、六員環は 6a から 6b に変化する。

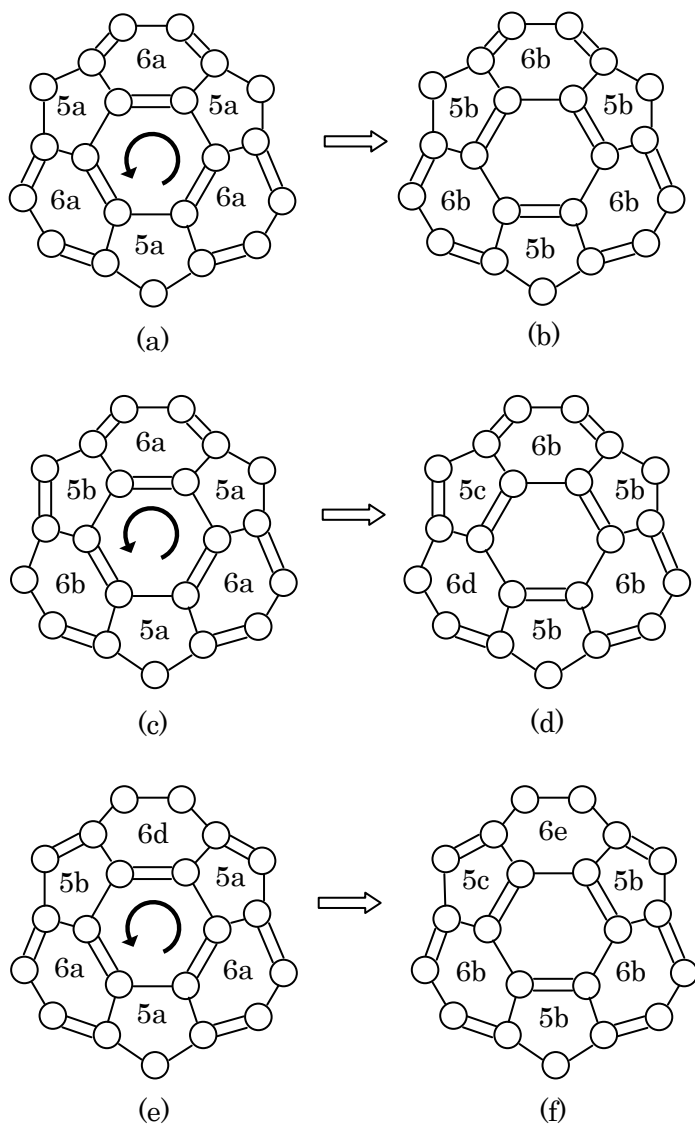


図 18. 六員環 6a の 60 度回転で新しいパターンを生成

回転移動によってできた図 18(b) のボールの向きを少し変えると、図 18(c)となるような配置が見つかる。つまり、中央に六員環の 6a、その周囲に五員環の 5a と 5b、六員環の 6a と 6b がある。前回と同様に、中央の六員環 6a は外に向かう 6 本の手はすべて単結合であるので、回転が可能である。そこで中央の六員環 6a を反時計まわりに 60 度回転すると図 18(d)となり、五員環 5b は 5c に、六員環 6b は 6d に変化する。

さらに、図 18(e)の状態では、中央の六員環 6a を反時計まわりに 60 度回転させると図 18(f)となり、六員環 6d は 6e に変化する。

このようにして、五員環が 5a、六員環が 6a だけの規則的な C_{60} モデルも、中央の六員環 6a の回転移動により、五員環の 5b, 5c や六員環の 6b, 6d, 6e をつぎつぎと生

成できたことになる。この操作はルービック・キューブの操作に似ている。ルービック・キューブの6面がすべてそろった状態（図 19 (a)）から，ある軸を中心に回転していくと（図 19 (b)），色がランダムな状態となる（図 19 (c)）。規則から不規則へ，その逆の不規則から規則へは，回転移動によって移動可能である。

ただし，考えられるすべての単結合と二重結合の配置が，六員環 6a の回転だけで移行が可能とはいえないようだ。たとえば，六員環 6c のように2つの二重結合が 180 度の配置にある場合は，この操作では実現できない。これについては別の機会に論じてみたい。

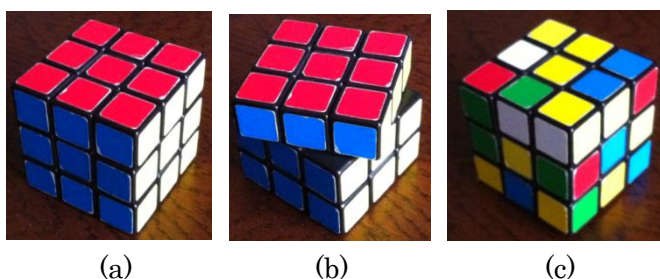


図 19. ルービック・キューブによる面の移動

C_{60} モデルでタイプ(a)とタイプ(b)のどちらが正しいかと問えば，どちらともいえない。コランニュレン（図 20）の積み上げとして C_{60} が生成されるとするならタイプ(a)であろうし，このモデルは高度な対称性をもっていて，分子の安定性も説明がつく。しかし，アーキ放電によりグラファイト棒から気化されたバラバラな炭素原子 60 個からいきなりフラレーン C_{60} が作られるとするなら，さらに電子の非局在性を主張するなら，タイプ(b)とするのが自然であろう。1991年に発表された J. M. ホーキンスの論文 [7]，W. F. デービッドの論文 [8] は，図 12 (a) を想定したものであり，図 12 (b) を説明できていないと思う。炭素間の距離の測定は 1991 年のものであり，20 年以上経過した現在，これらの実験値に対する評価はどのようになっているのか興味のあるところだ。

単結合と二重結合の区別をなくしたタイプ(c)は炭素原子の位置関係を示すものであるが，炭素の原子価が4である（結合の手が4本ある）ことをまったく説明していないことになる。(a)か(b)か，それとも(c)かについては，私は門外漢なので，これ以上深入りするのはやめよう。

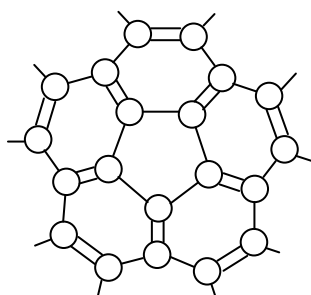


図 20. コランニュレン $C_{20}H_{10}$

(参考文献)

- [1] A. Tlahuice-Flores, R. L. Whetten, et al., Structure & bonding of the gold-subhalide cluster $FAu_{144}Cl_{60}^{[2]}$, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **15**, 2013.
- [2] Y. Nishiyama, Five Petals: The Mysterious Number “5” Hidden in Nature, *Int. J. Pure Appl. Math.*, **78** (3), 349-362, 2012.
- [3] Y. Nishiyama, The Sepak Takraw Ball Puzzle, *Int. J. Pure Appl. Math.*, **79** (2), 281-291, 2012.
- [4] 西山豊「エレガントな解答をもとむ」『数学セミナー』, **53** (1), 6, 2014.
- [5] A. C. Edmondson, *A Fuller Explanation*, Emergent World, 1992.
- [6] H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl & R. E. Smalley, C_{60} : Buckminsterfullerene, *Nature*, **318**, 162-164, 1985.
- [7] J. M. Hawkins, et al., Crystal Structure of Osmylated C_{60} : Confirmation of the Soccer Ball Framework, *Science*, **252**, 312-313, 1991.
- [8] W. F. David, et al., Crystal structure and bonding of ordered C_{60} , *Nature* **353**, 147-149, 1991.
- [9] 篠原久典『ナノカーボンの科学』, 講談社ブルーバックス, B-1566, 2007.
- [10] 大澤映二「超芳香族」『化学』, **25** (9), 854-863, 1970.