

目次

3D プリンターで魅せる化学の世界

中前 佳那子

(理系女性教育開発共同機構 特任助教)

| | |
|-----------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 3D プリンターの概要 | 2 |
| 3. 化学分野における 3D 教材の試作例 | 3 |
| 3-1 原子軌道を理解する | 3 |
| 3-2 分子構造の形を理解する | 8 |
| 3-3 身の回りの化学を理解する | 17 |
| 3-4 化学論文を理解する | 22 |
| 4. おわりに | 25 |
| 参考文献 | 26 |

3D プリンターで魅せる数学の世界

船越 紫

(理系女性教育開発共同機構 特任助教)

| | |
|-----------------------|----|
| 1. はじめに | 27 |
| 2. 3D プリンターについて | 29 |
| 3. 各作品の紹介 | 31 |
| 4. データの作成 | 52 |
| 5. 樹脂について | 59 |
| 6. おわりに | 60 |
| 参考文献 | 61 |

3D プリンターで魅せる化学の世界

中前 佳那子

1. はじめに

「ものづくり」分野での次世代を創るツールとして 3D プリンターによる技術革新が動き始めている。発端は、オバマ大統領が 2013 年の一般教書演説にて言及したことにはじまり、その第一歩として全米の小学校に対し授業で 3D プリンターを使うよう奨励された。¹ 教育分野への 3D プリンターの導入は特に STEM 教育を向上させるものとして期待され、欧米では活発にその導入が試みられている。中でもイギリスは 2016 年までにすべての中学校・高等学校へ 3D プリンターを導入しようという勢いがある。しかしながら日本では、2014 年度に 3D プリンターの導入のための助成金が経済産業省から出されたものの、世界的に見ると大きく遅れをとっているというのが現状である。

理系教育において、物の形状や機能の理解のために実物や模型等の立体物が必要になる場面が多くある。しかし、必要とされる実物や模型の入手が困難であること、また、模型を自作する場合も、複雑な形状のものや曲面状のものなど、その作成が難しい場合もある。以上のことから、立体物を、立体形状のデータに基づいて人手によらず自在に造形できる 3D プリンターは有用なものであると考えられる。そこで、今回は化学教育において 3D プリンターを用いることで目に見えない小さな物質を対象とする化学の世界を可視化し、触って体感する教材作りを提案する。ここでは、理系女性教育開発共同機構で導入した 3D プリンター（TierTime Technology 社製、UP Plus 2）を基にして、その概要について紹介するとともに、化学分野における 3D プリンターの活用について造型例を挙げて説明する。

2. 3D プリンターの概要

3D プリンターは、立体形状の情報が組み込まれた 3D データに基づき、その形状を、プラスチック等の素材によって造形するものである。3D プリンターの造形方法には何種類かあるが、廉価な 3D プリンターの造形方法の主流が、熱溶解積層 (FDM) 方式と呼ばれるものである。これは、熱で溶ける樹脂を 1 層ずつ積み上げていくもので、熱可塑性樹脂を溶解ヘッドから出力し幾層にも積み重ねて立体物を造形する。ここで、構造によって立体造形物を支えるためのサポートが必要となる。主な樹脂には ABS や PLA などが用いられる。² 図 1 に、その 3D プリンターの例として、当共同機構で導入した TierTime Technology 社製の UP Plus 2 を示す。

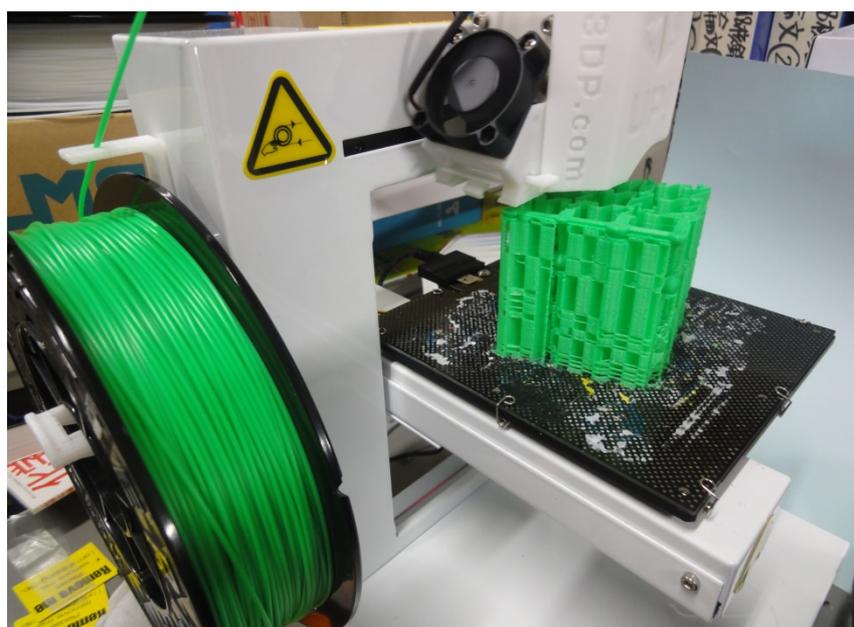


図 1 TierTime Technology 社製の 3D プリンター (UP Plus 2)

3D プリンター用の立体図形加工には、STL (stereo lithography, 日本では standard triangulated language) 形式のデータを準備する必要がある。このデータを利用することで、1 層分の平面図形を xy 平面上に 2 次元に加工し、 z 軸方向に順々に積み重ねていき 3D 造形物を作成することとなる。

3. 化学分野における 3D 教材の試作例

化学で学ぶ現象をひとつひとつ知るためには原子・分子の構造や電子状態を理解しなければならず、それは目には見えない非常に小さな世界を対象としている。例えば、分子構造について学習するとなると、教科書などの二次元の構造式を見て立体構造を想像するしかない場合が多いが、立体である分子構造を平面の構造式から理解することは大変である。特に複雑な立体構造をもつ有機化合物について理解するには、実際に分子模型を組み立てるのが手っ取り早く、かつかなり正確に情報を得ることができる。かのワトソン、クリックが DNA の二重らせん構造を見出すのに分子模型が大きな役割を果たしたことは間違いない。³ また、分子構造や結晶構造を取り扱うのに必須の概念である対称性を理解するにも立体的な構造を眺めたいところである。しかし、価格や対象の構造の複雑さからいつも市販の分子模型キットを用いることは難しい。そこで、3D プリンターによる自在な造形により、教育・研究面で有効な教材づくりを試みた。以下に応用例を 4 つの項目に分けて説明する。

3-1 原子軌道を理解する

化合物を形成する化学結合の主役である電子の状態を知ることが化学を学ぶ上で非常に重要である。原子がひとつひとつバラバラでいるときに電子の状態がどうなっていて、結合した時にはどうなっているかがわかれば、これでもう化学結合の全貌を知ることになる。そこで、ここでは手始めに原子の電子状態がどのようなになっているかについて説明する。⁴

電子が太陽の周りを回る惑星のように原子核の周りを一定の軌道でまわっているのならば電子の軌跡を追跡するのは簡単である。ところが、実際には電子は波のような性質を持っていることから単純ではなく、波の状態を表すツールとして「波動関数」を利用しなければならない。波には、「周期的に変化する」、「値が大きくなったり小さくなったりする度合いも、元の波と同じように変化

する」、「位置による変化と、時間による変化が同じような形になる」などの特徴がある。これらの特徴を数式で表したのが「波動方程式」と呼ばれるもので、これを解くと、波の状態を表す「波動関数」が算出される。ここで、重要なことは、電子には波としての性質の他に粒子としての性質もあることから、普通の波動方程式に修正を加えて、粒子の性質と波の性質の両方を組み込んだシュレーディンガーの波動方程式を用いることである。そしてこの方程式を解くことで、波動関数の形とそのエネルギーを知ることができる。波動関数の二乗は、ある空間で電子を捕まえようとした時にうまく電子が捕まる確率を表したものである。その意味で、波動関数は空間で電子が飛び回る場所、つまり電子の「軌道」を表している、とすることができる。その軌道である波動関数には、特徴的な3つの整数が含まれ、それぞれ、「主量子数」「方位量子数」「磁気量子数」と呼ばれる。ここでは、方位量子数に依存する軌道の形について考える。方位量子数が0, 1, 2, 3の軌道はそれぞれ、s軌道、p軌道、d軌道、f軌道と呼ばれているが、この名前は、それぞれの軌道に関わる発光現象に因んで名づけられ、sharp、principal、diffuse、fundamentalの頭文字である。

では、具体的な波動関数(軌道)の形を3Dプリンターで造形した模型を利用して説明する。図2～5には、サイト「Thingiverse」からフリーダウンロードで得られるSTL形式ファイルを利用してs, p, d, f軌道の概形を作製し、その写真を示している。赤色の部分と青色の部分は符号が逆で、波の山と谷の位置がちょうど反対であると考えればよい。この色の違いは、軌道が重なって化学結合を作る時に重要になる。

図2 からみるように、s軌道は丸く、球状である。主量子数が大きくなるほど大きく広がっている。



図 2 s 軌道

続いて、図 3 は p 軌道である。p 軌道には、磁気量子数が異なる 3 種類が存在する。このうち、磁気量子数が 0 である p_z 軌道と、他の 2 つは、式の中に虚数を含み位相がずれている波が含まれており、そのままでは図に描くことができない。そこで、この 2 つを足したり引いたりして位相が違う虚数部をうまく消すことで、 p_x 軌道と p_y 軌道という 2 つの軌道に組み替えられる。p 軌道は、よくダンベル型と言われるように、真ん中に電子の存在しない節面があり、その両側で符号が逆になる。



図 3 p_x , p_y および p_z 軌道

d 軌道には磁気量子数が5つあり、全部で5種類存在する。この中で、磁気量子数が0の d_z^2 軌道（図4b）及び、他の4つは位相の違う波を含むので、p 軌道と同じように組み替えを行わなければならない。まず、磁気量子数が -2 と +2 の2つを組み合わせると、 $d_{x^2-y^2}$ 軌道と d_{xy} 軌道を作る。さらに磁気量子数が -1 と +1 の2つを組み合わせると d_{yz} 軌道と d_{zx} 軌道ができる。これらを図4aに示した。d 軌道の場合、最低でも2つの節面があることがわかる。 d_z^2 軌道のみ節面が円錐形であるが、他の4つの軌道では節面は2つの直交する平面である。



図 4 a d_{xy} , d_{yz} , d_{zx} および $d_{x^2-y^2}$ 軌道

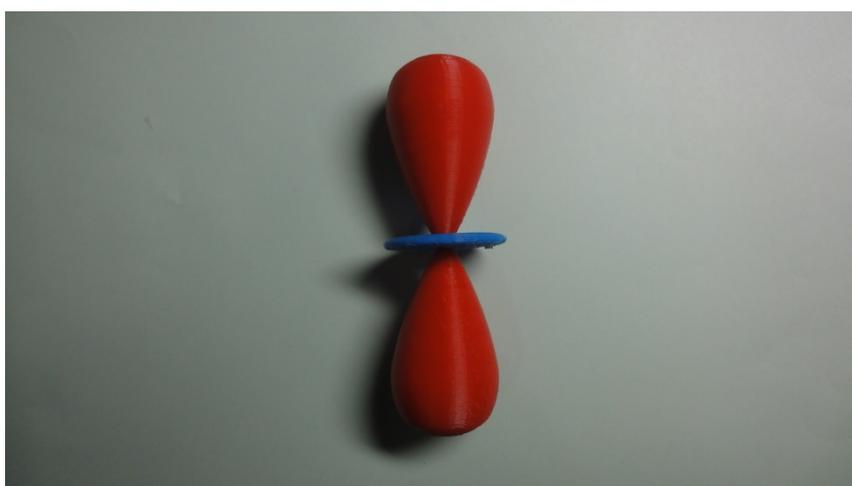


図 4 b d_z^2 軌道

最後に、7つのf軌道を図5に示す。ここで、形状が非常に複雑であるため単色で造形を行い、符号を反映できなかった。f軌道には核を切断する3つの節面があり、電子密度に8つの領域が存在する。



図 5a f 軌道 ①



図 5b f 軌道 ②



図 5c f 軌道 ③

3-2 分子構造の形を理解する

ここでは、特に市販の分子模型キットからは作製が困難であり、かつ形が特徴的な化合物を選択して、*J. Chem. Educ.* **2014**, *91*, 1174 に添付された STL 形式のファイルを用いて 3D プリンターによる造形を行った。⁵

硫黄

入試でもよく出題される硫黄の同素体は、単斜硫黄、斜方硫黄、ゴム状硫黄の 3 つである。常温で最も安定なのが斜方硫黄で、単斜硫黄やゴム状硫黄を放置しておくと、斜方硫黄へと変化する。また、硫黄原子が数珠状に繋がったゴム状硫黄を除き、硫黄原子 8 個が環状構造をつくった八員環の S₈ 分子からなるため、有機溶媒の二硫化炭素に溶けるという性質がある。この S₈ 分子の構造を図 6 に示す。単斜硫黄は淡黄色、斜方硫黄は黄色であることから、実際の色を反映させて黄色のフィラメントを用いて作製した。硫黄はおもしろい原子で、多硫化物という -S-S-S-S- が連なった構造をつくることができる。S₈ 分子も硫黄原子が 8 個つながった環状構造である。

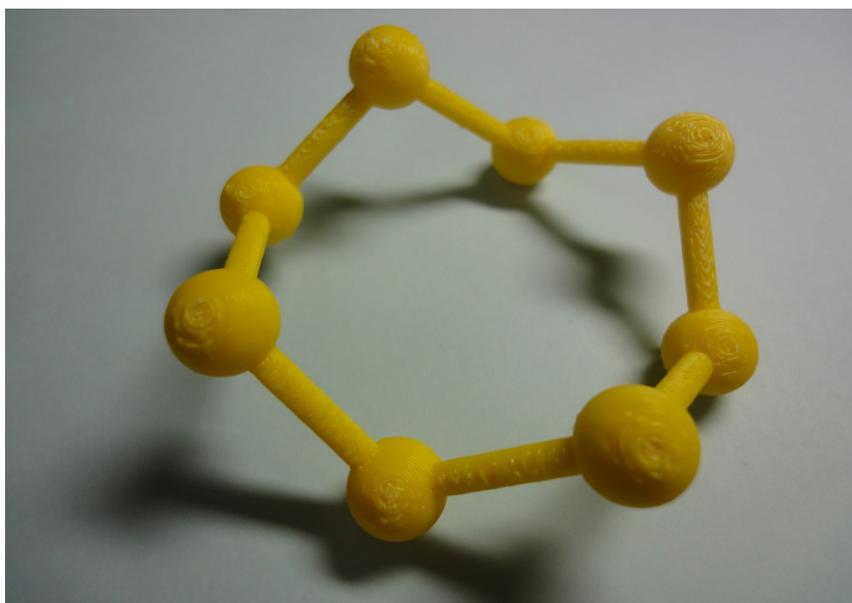


図 6 S₈ 分子 (すべて硫黄原子からなる)

アダマンタン

後に示すように炭素のみが集まって形成されるダイヤモンドの構造は非常に美しい。その一部を切り出した構造に相当する炭化水素が、1933年にチェコスロバキア産の原油から発見された。その構造を図7に示す。発見者はこの化合物に、ギリシャ語で「ダイヤモンド」を意味する「adamantinos」からとって、「アダマンタン」と名付けた。この言葉の語源は「征服されざるもの」で、まさにその名の通り極めて安定な化合物である。⁶ アダマンタンやその発展形となるダイヤモンドが極めて安定であるのは、炭素原子の結合に全くひずみが存在せず、最も理想的な形であることに由来する。

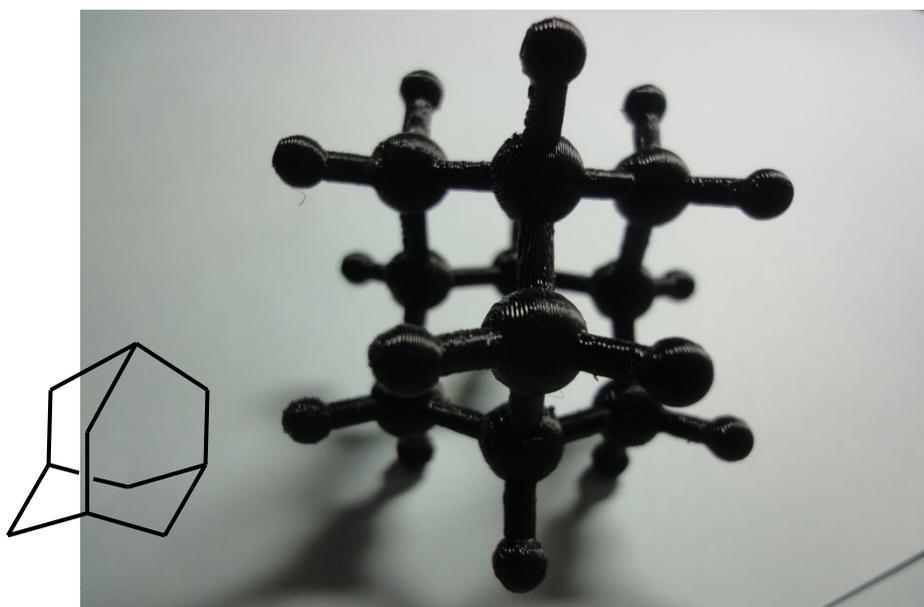


図7 アダマンタン（10個の炭素原子からなるかご型の分子である）

フェロセン

フェロセンは、 $[\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2]$ という化学式で表され、鉄原子の上下を2枚の正五角形が挟んでいる大変美しい構造をもった分子の1つである（図8）。鉄がシクロペンタジエニルアニオンにサンドイッチのように挟まれているために「サンドイッチ型錯体」と見なされる。この分子は1951年に偶然の産物によって発見され、X線構造解析によってサンドイッチ型分子であることが証明された。炭

素と金属が結合した分子は有機金属化合物と呼ばれ、フェロセンはその代表例である。フェロセンの発見は有機金属化学の歴史の輝くマイルストーンの一つで、有機金属化学の起爆剤である。そしてフェロセンは1973年にノーベル化学賞を英独の化学者にもたらした。⁷



図 8 フェロセンとねじれ形回転異性体（中央の大きな鉄原子が二つのシクロペンタジエニルアニオンによって挟み込まれた構造である）
（高さ:約 8 cm, 製作時間:約 2.5 時間）

金属錯体の異性体

金属錯体とは、分子の中心に金属イオンが存在し、それを取り囲むように非共有電子対を持つ配位子からなる化合物である。中心金属は、Fe, Co, Ni, Cu など様々である。そんな錯体の構造は、一般的に中心金属の種類とその酸化数、さらに取り囲む配位子の性質により決定され、最も多く存在するのは配位子が6つ取り囲んだ八面体型からなる化合物である。有機化合物において、分子の組成は同じであるが立体構造が違う異性体を理解することは非常に重要である。図 9 に示した 2-ピコリルアミンと塩素原子を配位子にもつ鉄(II)錯体 $[\text{FeCl}_2(2\text{-aminomethylpyridine})_2]$ を例にすると、2つの塩素原子が隣接するシス体と互いに 180 度の関係にあるトランス体が存在する。⁵

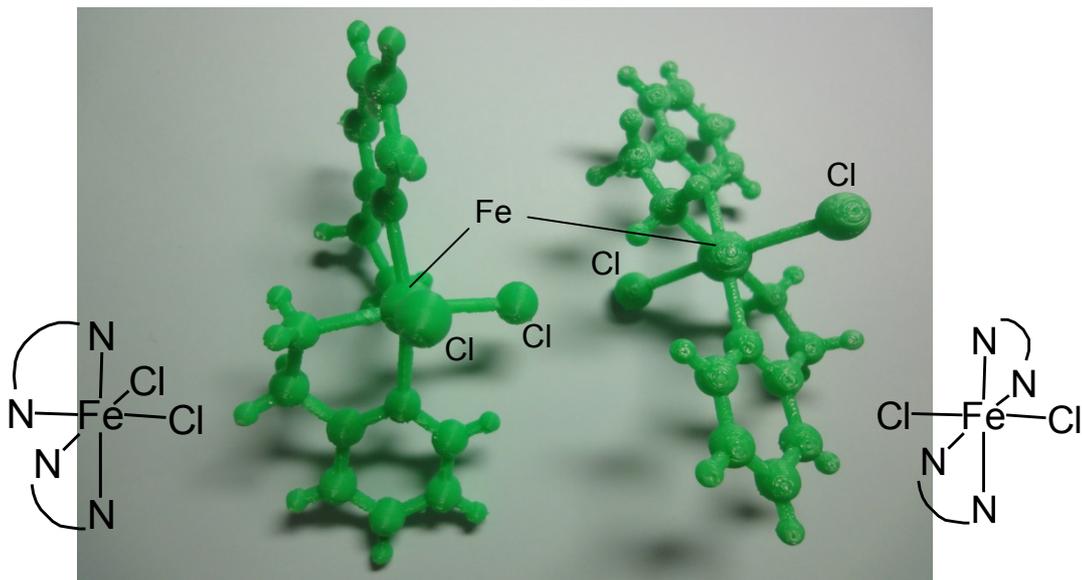


図 9 鉄(II)錯体 $[\text{FeCl}_2(2\text{-(aminomethyl)pyridine})_2]$ のシス体 (左) とトランス体 (右)

(中央の鉄原子に対して 2 つの塩素原子の位置関係が異なる)

また、二座配位子を 2 個以上もつ六配位錯体には光学異性体が発生する。二座配位子によるねじれが左回りのものは Λ (ラムダ)、右回りのものは Δ (デルタ) 体と呼ぶ。錯体 $[\text{Cd}(\text{ethylenediamine})_3]^{2+}$ を例にして図 10 に示した。⁵

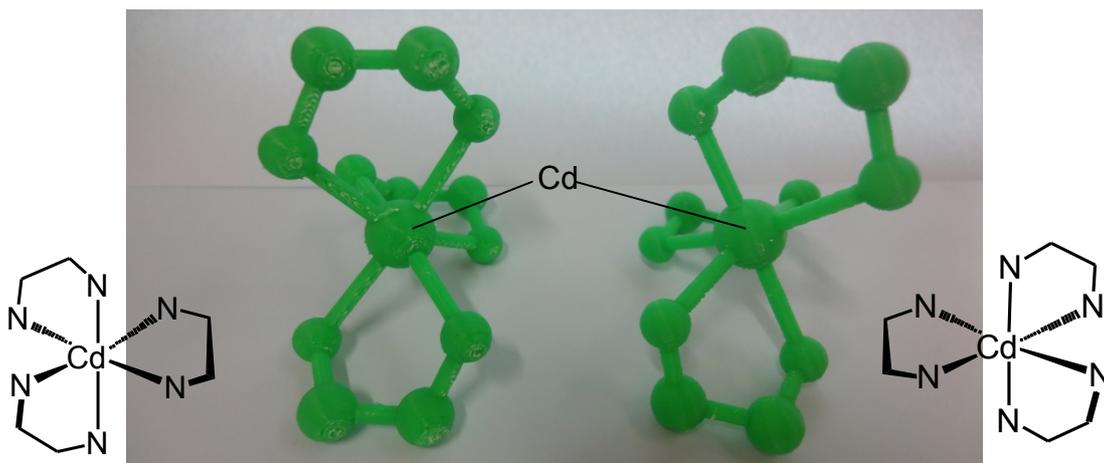


図 10 $[\text{Cd}(\text{en})_3]^{2+}$ のデルタ体 (左) とラムダ体 (右)

(中央のカドミウム原子まわりの二座配位子の配位の仕方が異なる)

高い対称性をもつ化合物

無機化学において分子構造の対称性をよく理解することは必須になってくる。少し高度な話になるが、化合物の構造は対称要素と対称操作によって分類される「群」をつくり、その「群」のことを「点群」と呼ぶ。「点群」は、固体の結晶に限らず、単一分子や錯体、いわゆるオリゴマーなどの凝集体についても表現することができる。ここでは特にどのような手順で点群に分類するかについての詳細を省くが、非常に高い対称性からなる美しい構造を有する化合物に関して点群を用いて紹介する。⁵ 点群が T_d に属する正四面体の対称性をもつ化学種としては既に示したアダマンタン (図 7) が挙げられる。 O_h 対称を有する正八面体の対称を持つものにはモリブデン錯体 $[\text{Mo}_6\text{Cl}_{14}]^{2-}$ を例に挙げた (図 11)。正四面体は対称中心を持たないが、正八面体は対称心をもち、その違いが正四面体と正八面体の錯体に観測される電子スペクトルに反映される。 I_h という点群に属する正二十面体点群の分子種はまれであるが、図 12 に示した $[\text{B}_{12}\text{H}_{12}]^{2-}$ はその例である。さらに、図 13 に T_h 点群に分類されるトリウム錯体 $\text{Th}[(\text{NO}_3)_6]^{2-}$ を示した。

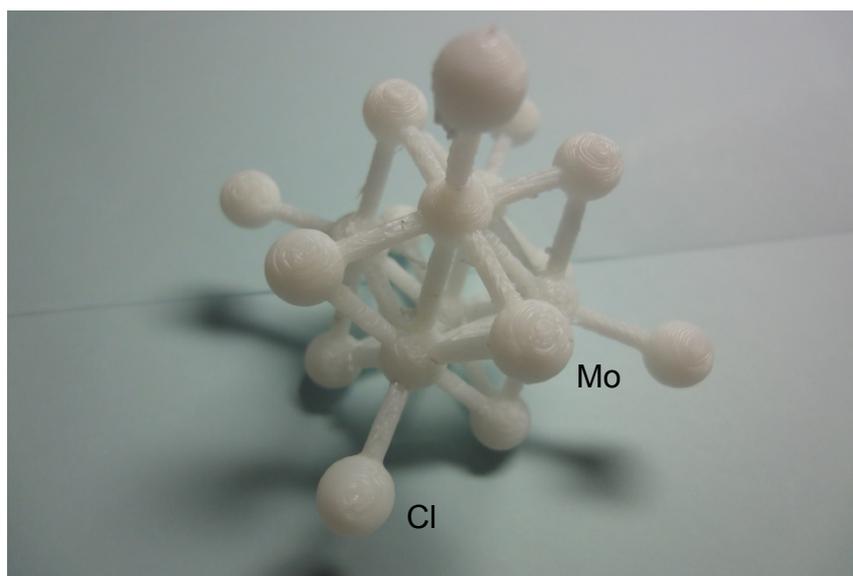


図 11 O_h 対称を有するモリブデン錯体 $[\text{Mo}_6\text{Cl}_{14}]^{2-}$
(6 個のモリブデン原子から成る中心骨格に 14 個の塩素原子が配位した構造)

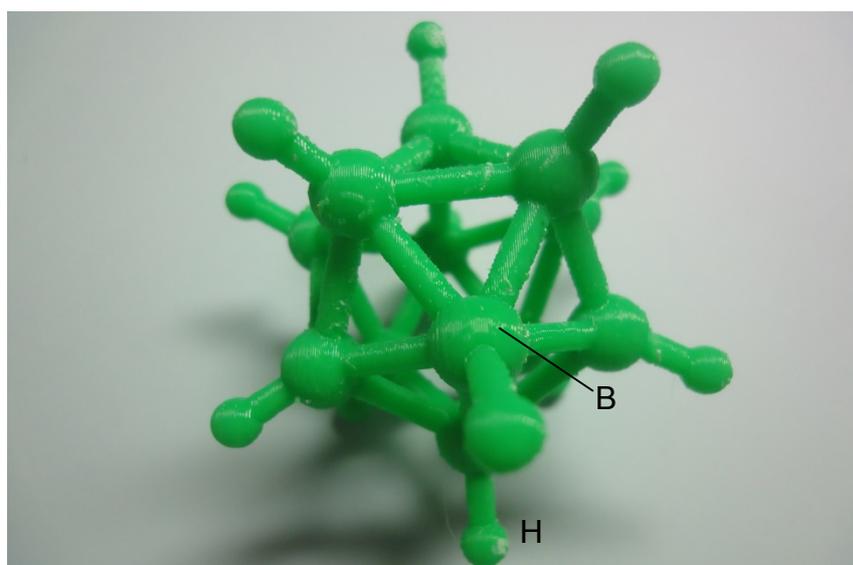


図 12 I_h 対称を有する錯体 $[B_{12}H_{12}]^{2-}$
 (より大きな原子のホウ素で構成される中心骨格に水素原子が結合している)

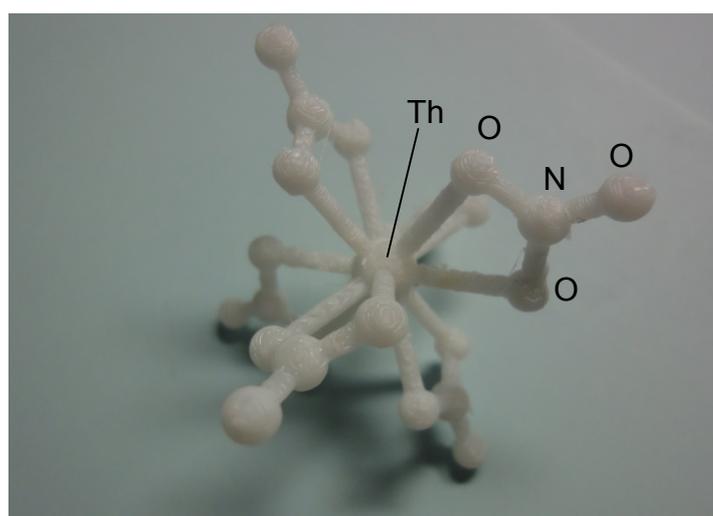


図 13 T_h 対称を有する錯体 $Th[(NO_3)_6]^{2-}$
 (中心のトリウム原子に 6 つの硝酸イオンが配位している)

イオン結晶の構造

結晶とは、イオンや分子などが規則正しく並んだ固体を指す。我々の身近でいえば塩化ナトリウムである食塩や砂糖の粒、石などがそれにあてはまる。ここでは、高等学校化学Ⅱで扱うイオン結晶として、塩化ナトリウム型と塩化セシウム型の 2 種類に対しそれらの構造を造形した。典型的な結晶である食塩の

粒をよく見ると、ひと粒ひと粒が全てサイコロのような立方体をしている。これはナトリウムイオンと塩化物イオンとが、まるでジャングルジムのように規則正しく並んでいる。専門的にみると、図14に示した塩化ナトリウム構造では、立方体の各辺に Na^+ (M) と Cl^- (X) が交互に並んでいることから、Xの面心立方格子の八面体型空隙のすべてをMが占有するということになる。Xは面心立方格子であり単位格子内に4個存在し、Mも八面体空隙のすべてを占有するために4個存在する。また、MはXの八面体型空隙にあるので、6個のXで囲まれる。一方のXは、やはり6個のMに正八面体型に取り込まれる。したがって、Mの位置にXを、Xの位置にMを置いても同じ結晶になる。⁸

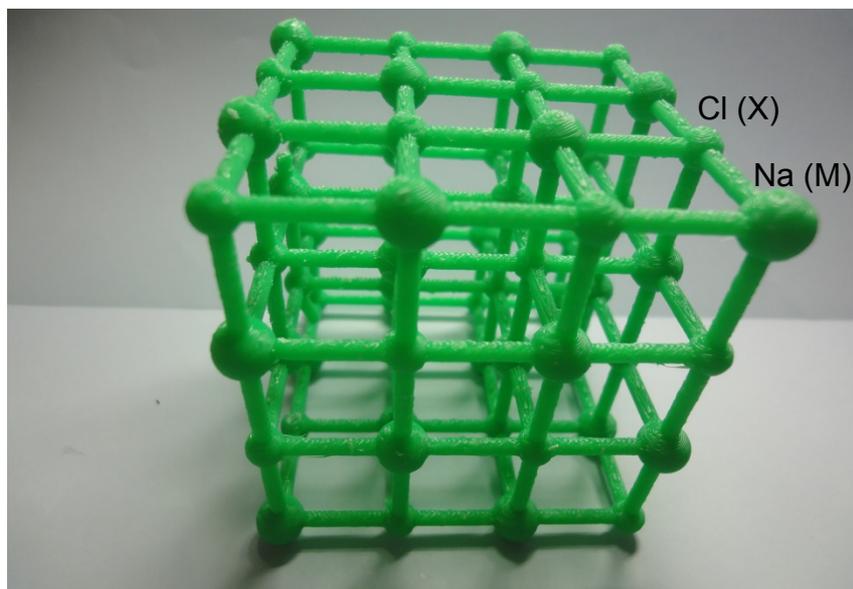


図14 塩化ナトリウム構造
(大きさ:約6 cm 角, 製作時間:約5時間)

図15に示した塩化セシウム構造は、見た目は体心立方格子である。 Cl^- (X)の体心立方格子の体心を Cs^+ (M) で置換した形になっている。8隅のXを合わせて1個、体心のMは正味1個であるから、Mの周りにXが8個隣接していなければならない。次にXに注目して格子を考えてみると、Mの立方体の体心にXがあることになる。すなわち、M、Xの位置は交換可能である。この形は

M, Xそれぞれが単純立方格子をつくっていることになり, 一方の単純立方格子の格子点が他方の単純立方格子の体心にくるよう重ね合わせた形ともいえる。

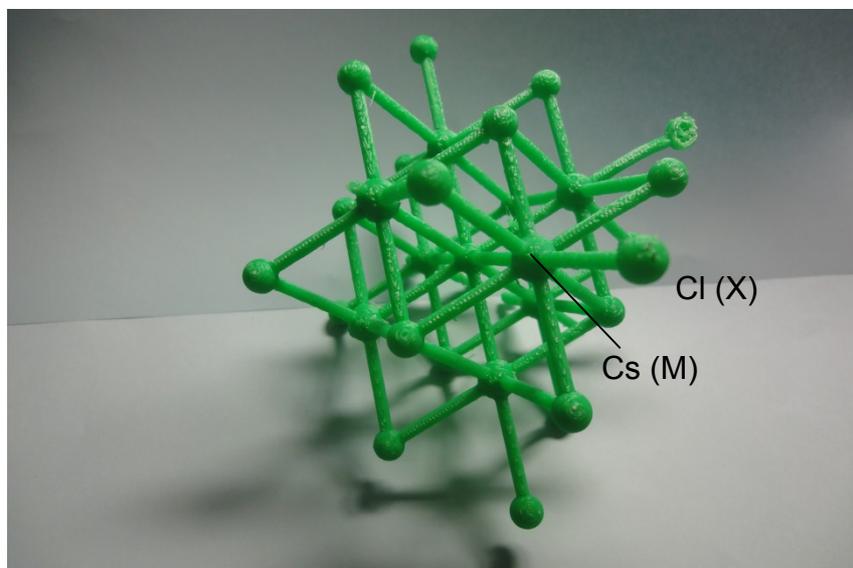


図 15 塩化セシウム構造
(大きさ:約 7 cm 角, 製作時間:約 5 時間)

ダイヤモンド

共有結合を形成する原子にはダイヤモンド (C)、シリコン (Si)、ゲルマニウム (Ge) などがある。これらは、最外殻電子が 4 個あり、第 1 隣接原子数が 4、第 2 隣接原子数が 12 で正四面体的に結合するダイヤモンド構造をとることが多い。図 16 に示したダイヤモンド構造をみると、2 組の同じ原子からできた面心立方格子を対角線長の 1/4 だけずらした構造となっている。また、ダイヤモンド構造は他の構造に比べて隙間が多い。結晶格子点に球状の原子が互いに接して結晶を構成するとき、単位格子内で原子の占める割合 (充填率) は 34%であり、面心立方格子や六方最密構造のような最密構造の充填率が 74%に比べて、半分以下となる。ダイヤモンド構造というのは眺めている角度によって三角形がたくさん見えたり、四角形がたくさん見えたり、六角形がたくさん見えたりする面白い構造である。⁸



図 16a ダイヤモンド構造 ① (すべて炭素原子からなる)



図 16b ダイヤモンド構造 ② (すべて炭素原子からなる)

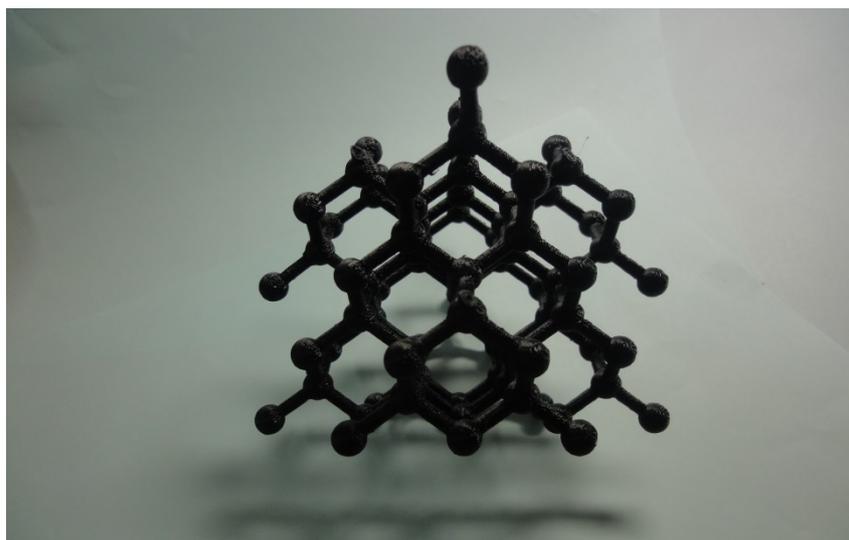


図 16c ダイヤモンド構造 ③ (すべて炭素原子からなる)

3-3 身の回りの化学を理解する

化合物の構造への興味をより喚起するため、カフェインや糖、さらに最近よく耳にするカーボンナノチューブなど、身の回りでよく知っている化合物を選択して造形を行った。STL 形式のファイルは *J. Chem. Educ.* **2015**, *92*, 1398. に添付されたものを使用した。⁹

おいしい「味」のある化合物

甘い分子として糖類の代表格がブドウ糖（グルコース）である。この構造を図 17 に示した。さらに図 19 にはもっとも身近な甘味である砂糖（スクロース）で、ブドウ糖と図 18 の果糖（フルクトース）がくっついた構造である。図からみるように水酸基の OH がたくさんついた構造であるが、一般に OH には甘味がある。糖類は体内でゆっくりと燃やされ、体を動かすためのエネルギーとなる。また、糖どうしがたくさんつながると丈夫な鎖になるので、体を支える構造材にもなる。セルロースはグルコースが一直線にたくさんつながったもので、植物の細胞壁はこれでできているため、グルコースはこの世に一番たくさんある有機分子といわれている。¹⁰

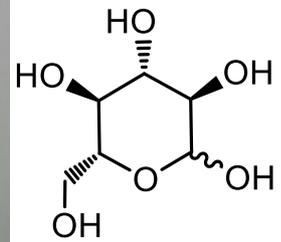
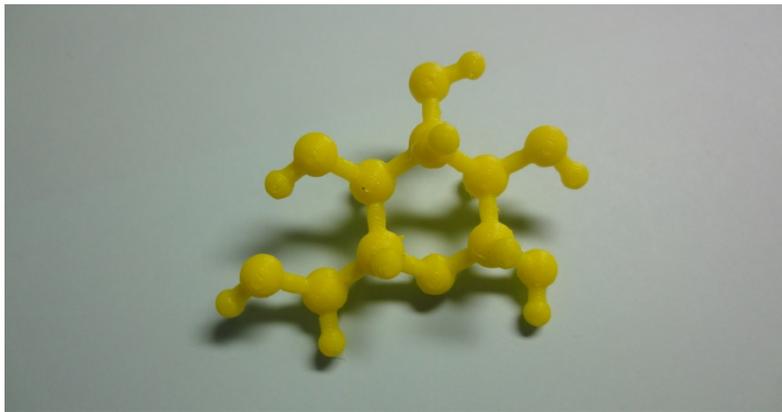


図 17 ブドウ糖（グルコース）の模型（左）と分子構造（右）

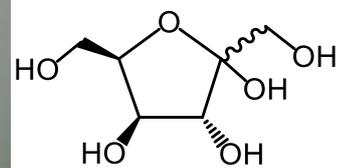
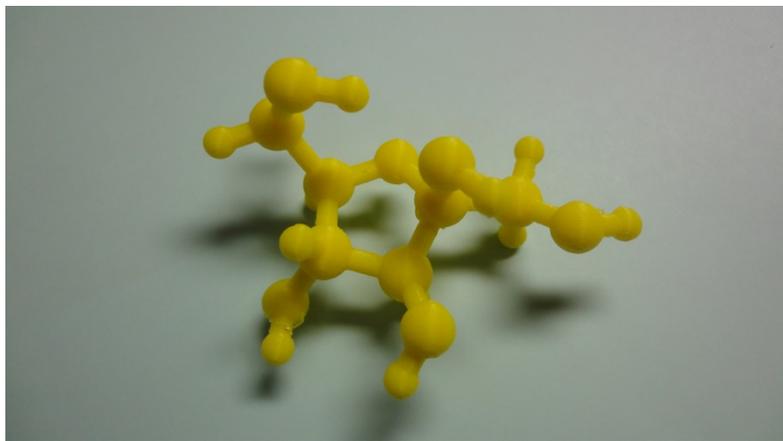


図 18 果糖（フルクトース）の模型（左）と分子構造（右）

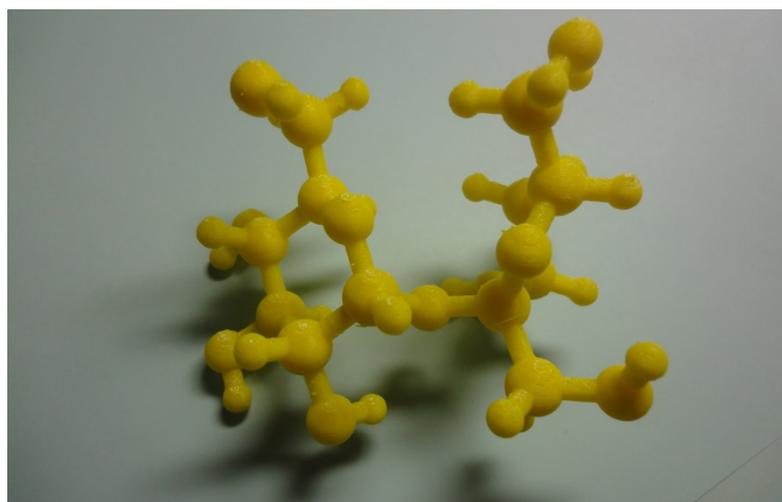


図 19 砂糖（スクロース）
(図 17 と図 18 に示した糖がグリコシド結合した二糖類)

「うまみ」の元になる化合物といえば、昆布から抽出されたグルタミン酸が有名であり、いわゆる化学調味料の主成分である。構造を図 20 に示した。グルタミン酸はタンパク質を構成する 20 のアミノ酸の一つであり、また脳内では伝達物質として働く極めて重要な物質である。

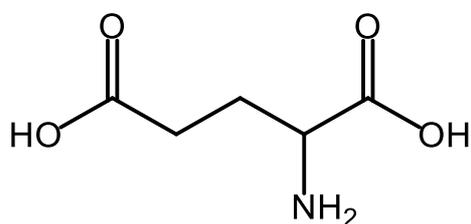
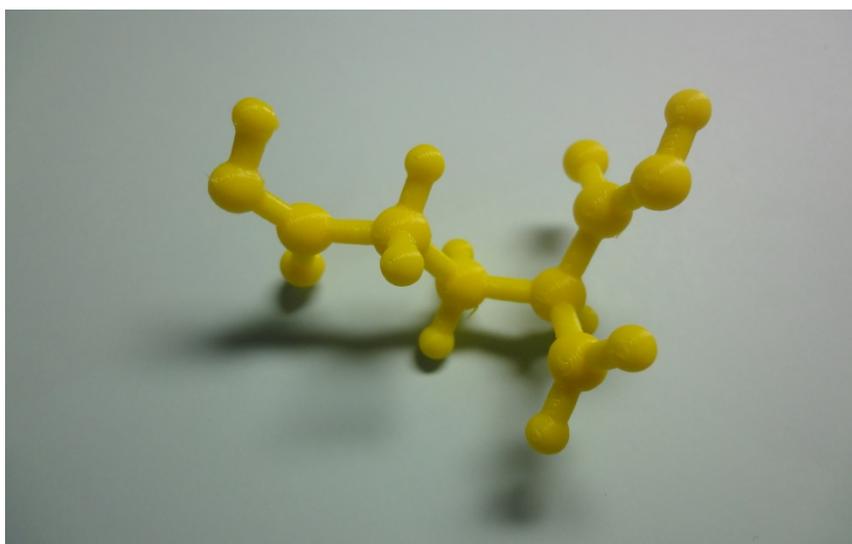


図 20 グルタミン酸の模型（上）と分子構造（下）

世界を救った化合物

人類最大の死因はマラリアであるという説があるが、そのマラリアの唯一の特効薬であったのが、アカネ科の樹木「キナ(*quina*)の木」から得られる「キニーネ」であった。¹¹ その構造を図 21 にしめす。南米の原住民は古くから、アンデスの高地に生えるキナの樹皮がマラリアに有効であることを知っていたとされており、西洋文明がこれを知ったのは 1630 年頃で、イエズス会の宣教師がこれを用いて治療活動を行っていた記録が残っている。さらに、18～19 世紀になってヨーロッパ諸国が植民地を求めて南下することでキナ皮の需要は一気に高ま

った。イギリス人がインド経営に成功したのは、彼らが毎日ジントニックを飲んでいたのである。トニックウォーターはキナのエキスを含んでおり、あの苦味は実はキニーネの味である。イギリス人はこれによってマラリアの害を避けることができていた、という冗談がいわれるほどキニーネの薬効は素晴らしかったと考えられる。

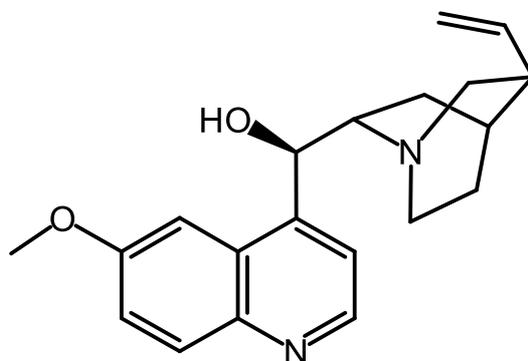
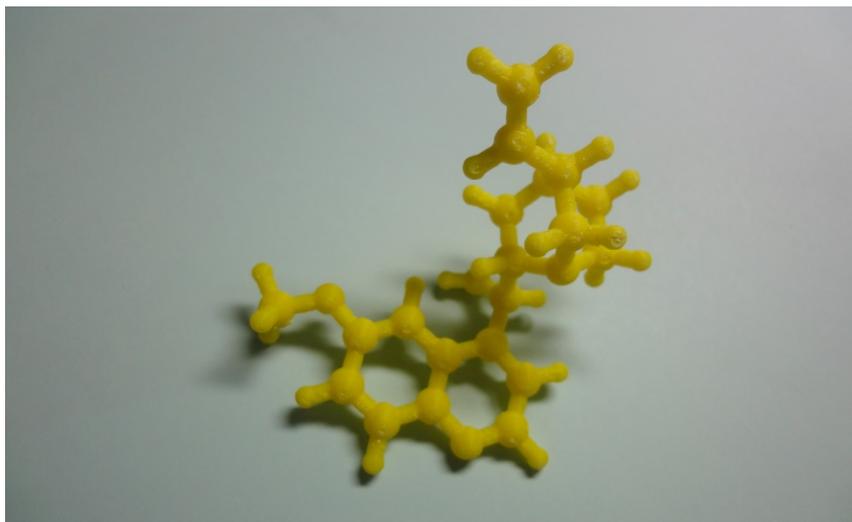


図 21 キニーネの模型（上）と分子構造（下）

世界が愛する飲み物の化合物

世界中で愛されている飲みものといえばコーヒー、茶類、またコーラが代表的なものと思われる。これらはすべて全てカフェインがたっぷり入った飲み物である。他にココアやチョコレートもかなりのカフェインを含み、やめられないという人も多い。よく知られているようにカフェインには疲労回復、頭の冴え、集中力が増すという効果がある。このために茶やコーヒーを愛好する文化

人・学者は多い。カフェインがフリードリプ・ルンゲによって初めて純粋に単離されたのは1819年で、最も早く発見された有機化合物のひとつである。彼にカフェインの研究を勧めたのは、コーヒー通で知られた文豪ゲーテであったと言われている。詩人と化学者の出会いがカフェイン抽出の契機になったという象徴的な出来事ともいえる。¹² カフェインの覚醒・興奮などの作用はアデノシン拮抗作用によると考えられている。アデノシンは体内物質の一つで、神経を鎮静させる作用を有する。この作用はアデノシンが受容体と呼ばれるタンパク質に結合することで生じるが、やや構造が似たカフェイン（図22）はアデノシンのかわりに受容体にとりつき、これをブロックすることができる。

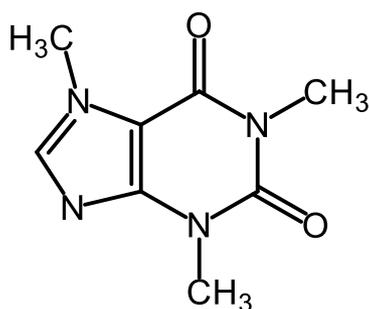
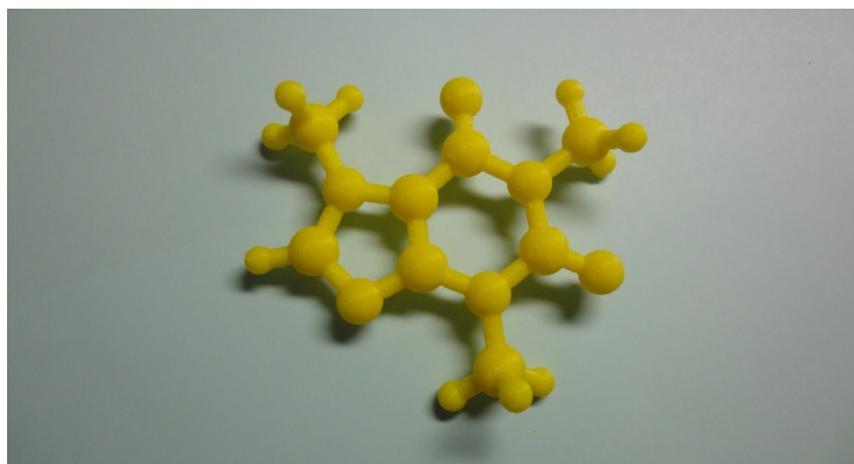


図 22 カフェインの模型（上）と分子構造（下）

世界を変える？驚異の新素材

1990年のC₆₀の大量合成法発見により、90年代初頭の科学界はフラッシュに沸き返っていた。これは、炭素電極をアーク放電によって蒸発させると、

陽極側にたまった「すす」に C₆₀ が大量に含まれているというものである。こうして各国中で多くのフラーレンを生産しようと躍起になっていたころ、世界でたったひとりだけ「陰極側」のすすを観察していた人物がいた。NEC 基礎研究所の、飯島澄男主席研究員（現在名城大教授兼任）がその人である。彼がフラーレンを観察しようと陰極にたまったすすを電子顕微鏡にかけてみたところ、球状のフラーレンとは全く違う、からみ合った細長いチューブ状のものがたくさん観察された。このようにして驚異の新素材「カーボンナノチューブ」が発見された。今ではフラーレン類よりも大きな注目を集める存在となっている。¹³ ナノチューブの太さはその名の通り 1 nm（10 億分の 1 メートル）前後であり長さはその数千倍に達する。

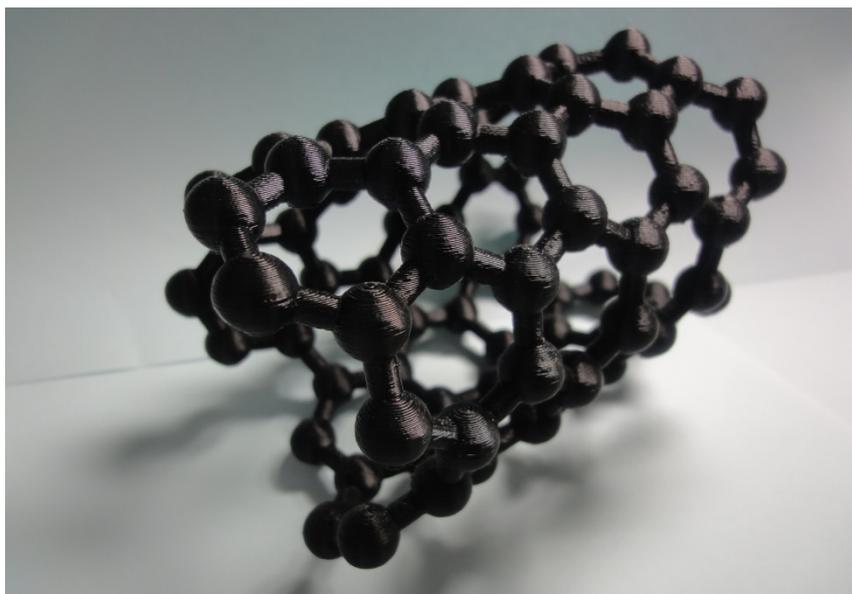


図 23 カーボンナノチューブ（すべて炭素原子からなる）
（長さ：約 10 cm, 製作時間：約 6 時間）

3-4 化学論文を理解する

最後に筆者が自ら合成した化合物を紹介する。筆者が所属していた研究室では、目には見えない小さな物質に複数の金属イオンをとりこんだ“金属クラスター化合物”を合成している。特徴的であるのは、金属イオンをつかまえる手

となる 4 つのリン原子をもつ“有機配位子”を開発し、複数の金属イオンが直接つながった化合物を作っていることである。近い位置に金属原子が並ぶと互いに協力し合って、これまでにない性質や反応性が現れると期待できる。このような化合物の応用の一つに“ナノテクノロジー”があげられる。“ナノテクノロジー”とは、1メートルの10億分の1という小さな世界で行う最先端技術である。例えば、学術雑誌 (*Angew. Chem. Int. Ed.* **2015**, *54*, 1016)¹⁴で発表した8個のパラジウムが一次元に並ぶ直鎖状パラジウムクラスターは、多くの金属原子が並ぶ形から最も小さくて細い電線とみなすことができ、将来、コンピュータや携帯電話などに使われているような電子部品として利用できると考えている(図25)。その直鎖状パラジウム八核錯体の構造を図24に示した。造形には、得られた結晶データ CIF (Crystallographic Information File) を STL 形式のデータファイルに変換できるフリーソフト (CIF2VRML X-ray structure tool) を利用して造形した。

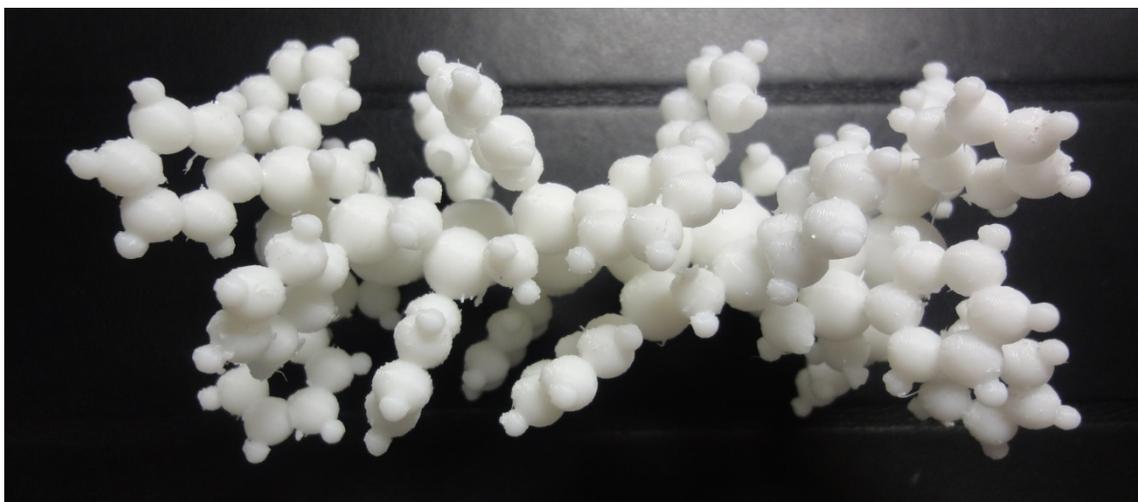


図 24 直鎖状パラジウム八核錯体の分子模型

(8個の大きなパラジウム原子が直線に並び、その周りを4つの配位子にとりかこまれた構造) (長さ:約 12 cm, 製作時間:約 8 時間)

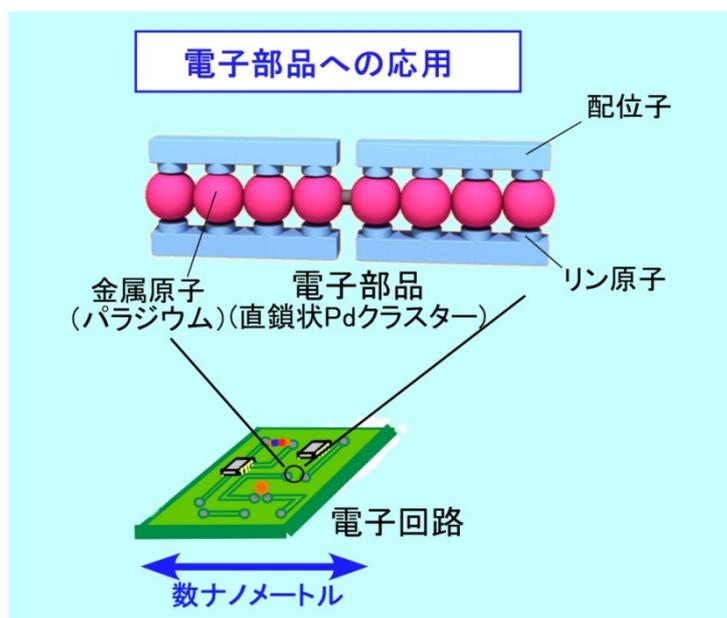


図 25 パラジウムクラスターの応用例

金属クラスター化合物を新たに開発することは、より便利で地球にやさしい未来につながるものと期待して、今も挑戦を続けている。

4. おわりに.

今回は化学分野の理解を促すための 3D プリンターの利用法について例を挙げて示した。化学では化学実験という体験型の授業もあるが、その実験で行った現象をきちんと理解するには教科書などに載っている二次元的な分子の構造式をみることになる。物質の性質や反応性などにも関与する分子構造や電子状態はすべてにおいて立体的な考察力が求められるが、立体である分子構造を平面の構造式から理解することは大変である。それでは、きちんと理解せぬまま教科書にのっていることを覚えるしかない、と丸暗記に追い込まれる恐れがあり、この丸暗記が化学嫌いを作るひとつの要因になるものと考えられる。そこで、3D プリンターを用いた造形物から三次元的に見て触ることができれば構造の立体的な理解が深まり、さらに化学への興味が喚起されるものと期待される。つまり、3D プリンターは分子レベルの目には見えない非常に小さな化学の世界を覗くことを可能にしてくれる。

さらに、3D プリンターを教育界に取り入れる最大のメリットと考えられるのは「アイデアを形にすること」がこれまでよりもかなり簡単にできるようになったことである。これまでは分子構造を組み立てるにもキットのように自由度が限定されてしまうものを使わざるを得なかった。3D プリンターは自由なアイデアや発想を簡単に正確な形として具体化することを可能にし、また改良を加えることも容易であるという魅力がある。そしてこの「アイデアを形にする」という体験は、新しいことに挑戦する楽しさを知り、考え方と行動力を育ててくれるだろうと考えられる。化学において「新しいものを作って世の中を変えよう」という試みは、資金や安全面などの問題から大学などの特別な機関でしか実現しないとこれまでは考えていたが、そうでなくとも早い段階で 3D プリンターを用いた新たな発見が化学の世界に生まれるような予感がする。

参考文献

- 1) https://www.jetro.go.jp/ext_images/jfile/report/07001465/us_manufacturing_3d_printer
- 2) Yoshimura, T. *J. Technology and Education*, **2014**, *21*, 53.
- 3) Leslie, A. G. W.; Arnott, S.; Chandrasekaran, R.; Ratliff, R. L. *J. Mol. Biol.* 1980, *143* 49.
- 4) <http://hr-inoue.net/zscience/topics/chemicalbond/chemicalbond.html>
- 5) Scalfani, V. F.; Vaid, T. P. *J. Chem. Educ.* **2014**, *91*, 1174.
- 6) <http://blog.livedoor.jp/route408/archives/52036341.html>
- 7) Werner, H. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2012**, *51*, 6052.
- 8) 足立吟也(1995)『固体化学の基礎と無機材料』(化学教科書シリーズ)丸善出版
- 9) Rossi, S.; Benaglia, M.; Brenna, D.; Porta, R.; Orlandi M. *J. Chem. Educ.* **2015**, *92*, 1398.
- 10) D. Voet, J. G. Voet, C. W. Pratt 著, 田宮 信雄, 村松 正實, 八木 達彦, 遠藤 斗志也 訳(2010)『ヴォート基礎生化学』東京化学同人
- 11) P・ルクーター, J・バーレサン 著 小林力 訳(2011)『スパイス、爆薬、医薬品 世界史を変えた 17 の化学物質』講談社現代新書
- 12) ベネット・アラン ワインバーグ, ボニー・K. ビーラー 著, 別宮 貞徳, 亀田 幸子, 岩淵 行雄 訳(2006)『カフェイン大全—コーヒー・茶・チョコレートの歴史からダイエット・ドーピング・依存症の現状まで』八坂書房
- 13) 飯島 澄男(1999)『カーボンナノチューブの挑戦』岩波科学ライブラリー
- 14) Nakamae, K.; Takemura, Y.; Kure, B.; Nakajima, T.; Kitagawa, Y.; Tanase, T. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2015**, *54*, 1016.

3D プリンターで魅せる数学の世界

船越 紫

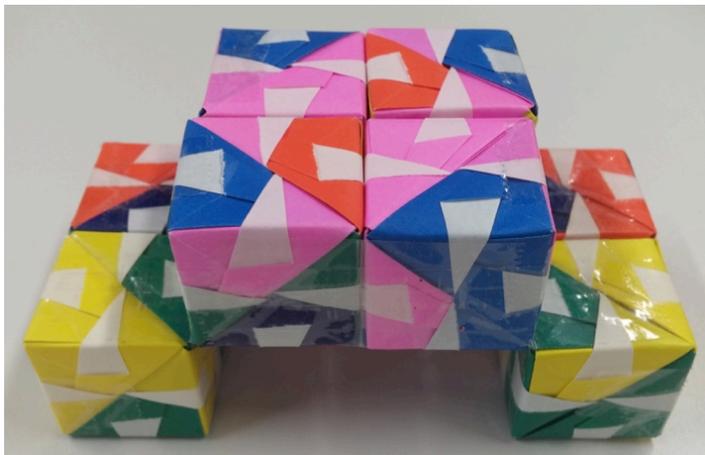
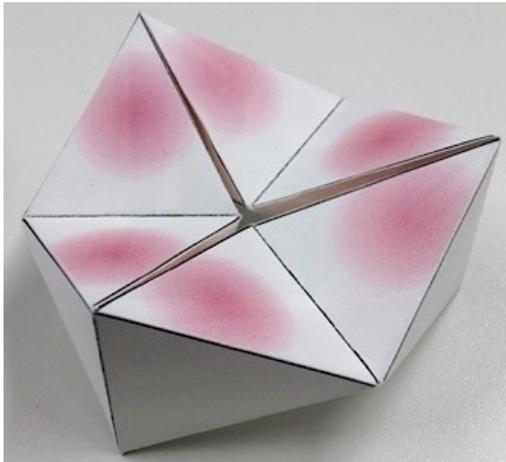
1. はじめに

私の専門は数学の幾何学である。幾何学とは図形について考察する数学の一分野であるが、中学校・高等学校の数学においては必ず一定数、図形の問題を苦手とする人が存在する。単純に好き・嫌いもあるとは思いますが、中には図形をイメージする事が得意ではないという人もいるだろう。平面図形でも分かりにくいのに、立体図形になると想像もつかない、という人もいるかもしれない。しかし想像がつかなかったものでも、実物を目で見ることによって納得できるということはあるのではないかと思う。そこで、最初は目で見る図形として、色々な数学に関わるものを折り紙で作ろうと試みていた。以下はその一例である。

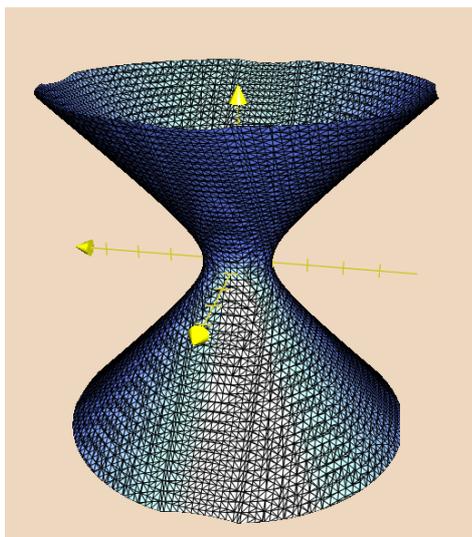


これは宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所の三浦公亮（現・東京大学名誉教授）が考案した、ミウラ折りと呼ばれる折り方である。対角線部分を持って引っ張るだけで開閉することができる。人工衛星のパネルの展開や、地図のたたみ方などに応用されている。

次の写真はカライドサイクルと呼ばれるものである。数個の四面体を、いくつかの辺同士でつなげた形になっており、中心から開いていくことで無限に回転させることができる立体である。



左の写真は「無限に開く立方体」と言われるもので、8個の立方体がある規則でつながっていて、向きを変えなくてもパカパカと次々に「開いて」行くことができる。



左の図は一葉双曲面と呼ばれる曲面であり、回転軸に対して傾いた線分が軸の

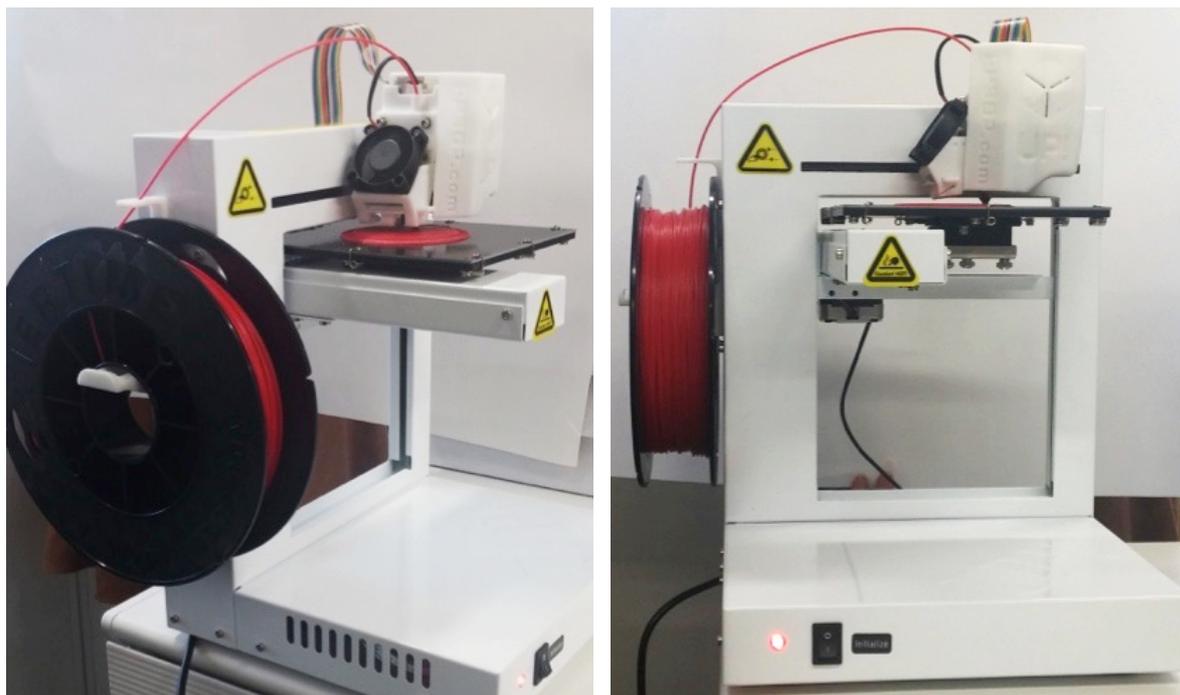
周りを回転することによって作ることができる立体である。折り紙で一葉双曲面と似た形を作ったものが右の写真である。折り目をさらに多くすれば、なめらかな一葉双曲面に近づけることができる。

しかしより複雑な立体を作成しようとする、一つを作成するのに非常に時間がかかる上に、折り紙では作成そのものが困難なものも存在する。そこで、奈良女子大学 理系女性教育開発共同機構で導入した 3D プリンターを使用することによって、さらに作成できる物の幅が広がるのではないかと考え、使ってみることにした。3D プリンターを使い始めてから 1 ヶ月程度なので、思うものを自由に作れるというところにはまだ至ってはいないが、作品を作ってきた中で幾つかの気づきを記録すると共に、これまでに作ってきた作品に関して簡単に紹介していこうと思う。

2. 3D プリンターについて

3D プリンターとは、通常の紙に印刷する平面的な二次元プリンターとは違い、3D のデータを元に立体物を出力するプリンターのことである。業務用の 3D プリンターは、樹脂素材、石膏や金属など様々な素材を扱うことができ、フルカラー出力が可能なものもある。それに対して個人向け・家庭向けの 3D プリンターでは主に樹脂素材が用いられる。3D プリンターで立体物を造形する基本的な仕組みは、出力する物体の 3D データをコンピュータ上で作成し、そのデータを一定の間隔に（地面と水平に）デジタル上でスライスし、スライスしたデータの通りに、層ごとに溶かした樹脂を重ねていくことで立体物を形成する、というものである。実際に出力を始めると、土台が出力されて、必要な場合には支えの部分が出力され、最後に 3D データが立体として出力される。出力が終われば、土台と支えの部分は手で取り外すことができる。基本的には下から上に溶

かした樹脂を積み重ねていくので、出力したい物の形や、データとプリンターとの相性によっては造形が難しいものがあるようだ。

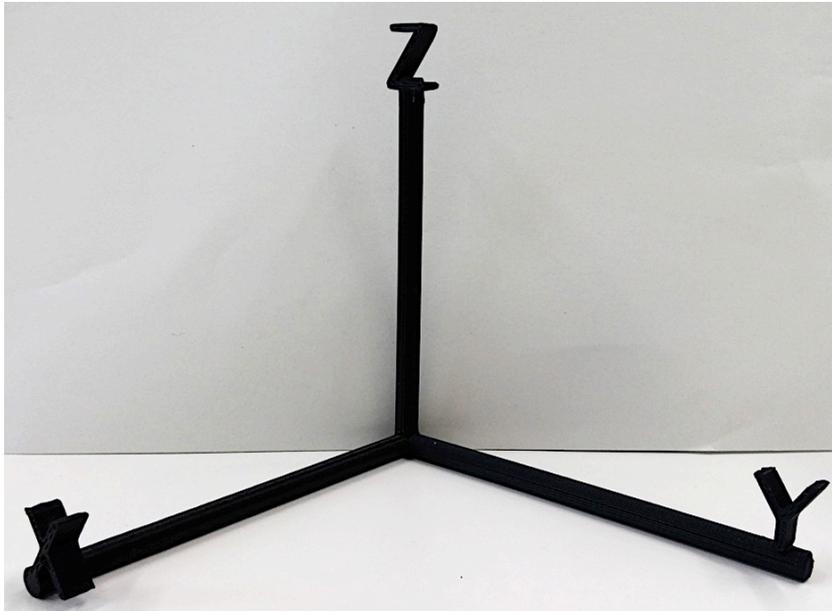


上の写真が、実際に使用している 3D プリンター (UP PLUS2) である。価格は比較的安価であり、本体もシンプルでコンパクトかつ軽量の、個人用の 3D プリンターではあるが、精度が良く動作も安定しているので、非常に使いやすい。出力した立体物から支えの部分が外しやすいのも、特徴のひとつなのではないかと思う。また、イニシャライズ (初期化) するときや、パソコンから 3D データを送るとき等の電子音は大きいですが、作成中の音はほとんど気にならない程度である。使える樹脂の色はホワイト・ブラック・レッド・グリーン・ブルー・イエローの 6 色だが、この 3D プリンターでは単色での出力となる。

3. 各作品の紹介

“3D axes” by intijk.

<http://www.thingiverse.com/thing:235653>



所要時間

1時間28分

10cm×10cm×10cm

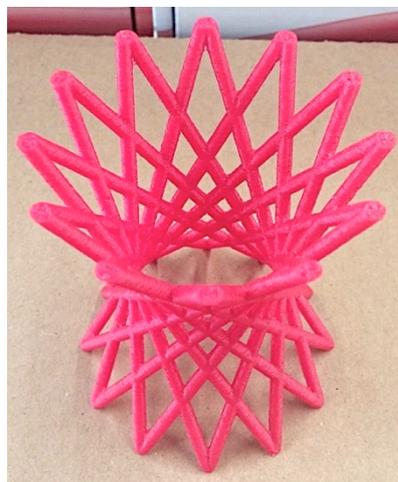
上の写真は xyz-軸 をプリントしたものである。このような形だと、下から上に、順番に積み上げていくだけでよいので特に問題なくきれいな状態で出力される。実際の出力の際には、右の写真のような形で出力された。「Y」軸と「Z」軸が最初に出力され、最後にそれらの軸とは互いに垂直になるように「X」軸が出力される。「X」の文字



の部分は宙に浮いているような状態になっているが、ここは最初に支えの部分が作られて、その上に「X」を積み上げていくことによって作られる。完成後には土台と共にその支えを取り除くので、このような形が実現できるのである。最初に出力された2本の軸は比較的短い時間で出来上がったのだが、残りの一つに関しては小さな円形に樹脂を絞り出し、それをどんどん上に積み上げていく必要があるため、作業が細かくなり、想像以上に作成に時間がかかった。

“hyperboloid” by George W. Hart.

<http://www.georgehart.com/rp/makerbot/makerbot.html>



所要時間

3時間14分

これは先の折り紙でも紹介した一葉双曲面と言われるもので、回転軸に対して傾いた線分が軸の周りを回転することによって作ることができる立体である。注意して見ると一つ一つの棒が曲がってない真っ直ぐな棒になっていることが分かる。これはその特徴が分かりやすいように少ない本数の棒で出来ているが、隙間がないくらいたくさんの棒で埋めると、「面」になる。真っ直ぐな線が集まって曲がった面ができる、非常に面白い立体物ある。神戸ポートタワーがこの双曲面の構造をとる建造物として知られている。全体のサイズとしては地面と接する部分は直径5cmの円におさまり、高さが約8cmなので大きいわけではないのだが、棒ごとに一本一本丸い形に樹脂を絞り出して重ねていくので、やはり時間がかかった。3Dのデータをデジタル上で地面と水平にスライスした時、スライスした断面面積だけではなく模様の複雑さなども影響して、出力にかかる時間が決まるのだろう。

“Möbius Strip” by GunpowderGreen.

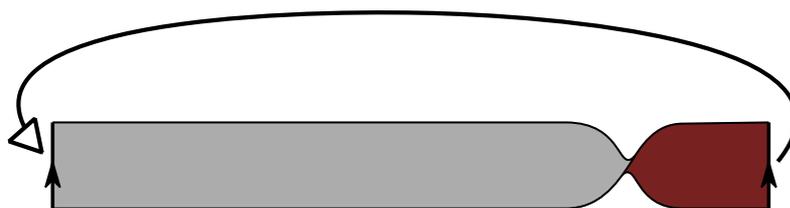
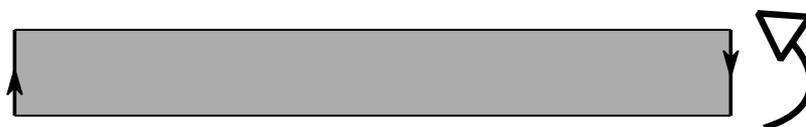
<http://www.thingiverse.com/thing:1061464>



所要時間

1 時間 13 分

7cm×1cm×3cm



これは上の図のような帯についての向きが合うように張り合わせることで得られる曲面で、メビウスの帯（輪）と呼ばれるものである。つまり一本の帯の片方を 180 度ひねり（上）、他方の端に貼りあわせる（下）ことで得られる。曲面に裏・表を決めることが出来ないのが特徴である。

帯が輪になっているので、天井のようになっているところ、写真で言うとねじれている部分の周辺は「樹脂を下から積み上げていく」ことが難しい。したがって、出力の際に支えが必要になる。上の写真は非常になめらかに仕上がりになったものであるが、他のメビウスの帯のデータではなかなか綺麗な仕上がりにとはならず、まるで空中の何も無いところに樹脂を吐き出しているような状態になることがあった。プリンターの能力とデータとの相性によっては、3Dのデータの通りに出力できないことがあるらしいということが分かった。特に天井の様になっている面があると、支えが足りないような状況が起こったときに、面が滑らかではなくなったり、崩れてしまったりということがあった。

“Simple Klein Bottle” by spincrisis.

<http://www.thingiverse.com/thing:1193303>



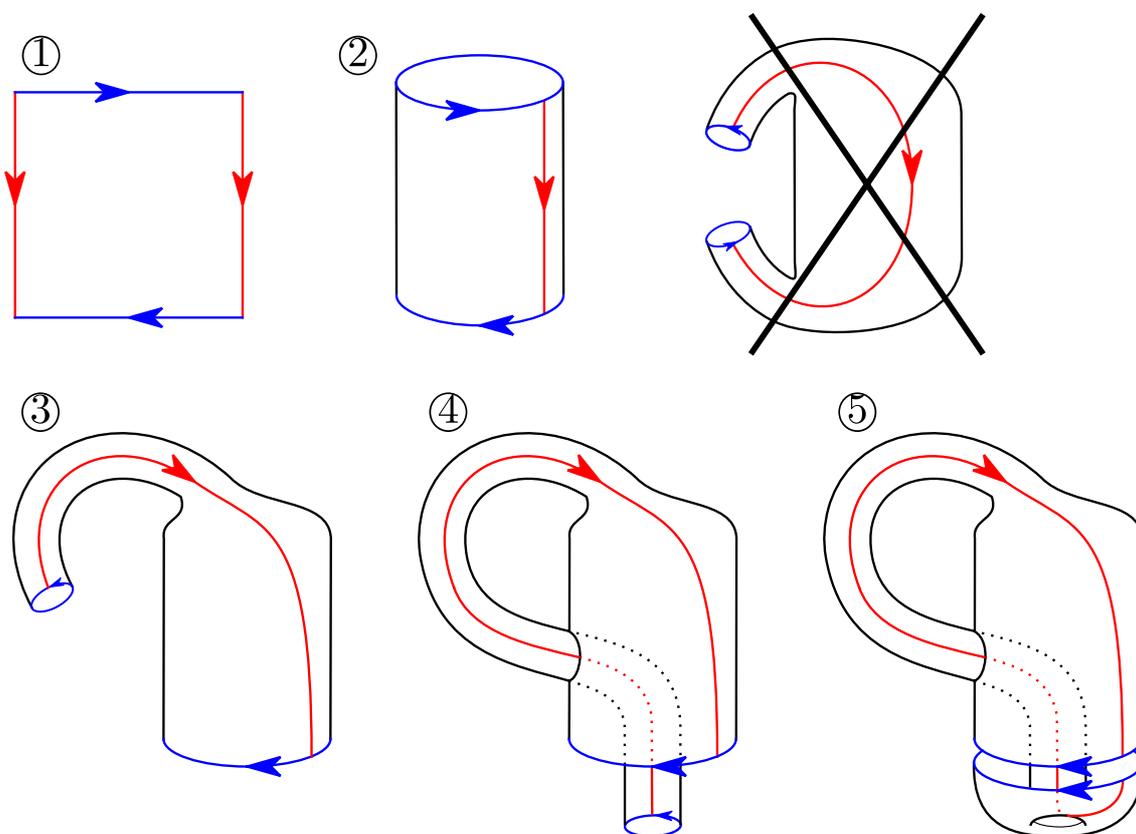
所要時間

1 時間 1 4 分

3cm×3cm×5cm

これはクラインの壺と呼ばれ、先に出てきたメビウスの帯と同じように裏表のない曲面である。クラインの壺は次の図の①のように向きがついた正方形の

対辺を、矢印の色と向きが合うように、穴をあけずに貼り合わせることで得られる曲面である。②で赤い辺同士を貼り合わせた後、青い辺同士をそのまま貼り合わせようとしても向きが合わない。青い辺同士の向きが合うようにするには③～⑤のように貼り合わせる必要がある。この貼り合わせは私達が住む3次元の世界では曲面に穴を開けず実現することが出来なくて、4次元の世界では実現することが可能である。



したがって、先の写真のものは完全なクラインの壺ではないが、クラインの壺のイメージを3次元空間で表現したものであり、右の写真は内部の様子が見えるように、クラインの壺を縦に2つに割ったものになっている。特に、縦2つに分かれたほうを作成する際には右の写真で写っている状態とは上下を逆に、ドーム状になっている部分が上になるように出力したのだが、出力された樹脂に、ところどころ隙間が空いてしまっている。どうやらドーム状になっ

ている部分のふくらみが小さい状態で出力してしまったので、3D データを一定の間隔でスライスした時に、一つの層の面積が広くなり、面を全て埋めることが出来なかったのが原因ではないかと思う。

今回の所要時間は1つのクラインの壺を出力するのにかかった時間である。クラインの壺を縦に2つに割ったものは、左右合わせて同程度の時間がかかった。また、このようにある程度体積のある立体を出力する際は、内部をどの程度樹脂で埋めるかによって所要時間も大きく代わる。今回は表面だけで内部は空洞にしてあるので、出力にかかった時間は短かった。

“Voronoi Klein Bottle” by MadOverlord.

<https://www.thingiverse.com/thing:145694>



所要時間

1 時間 27 分

3cm×3cm×5cm

こちらも同じくクラインの壺であるが、中の構造が見えるように網目状になっている。やはり細かい作業になってしまうので、同じクラインの壺でもこちらのほうが出力には少し時間が多くかかった。ただ、網目状になっていて形が

複雑なので仕上がりが心配ではあったが、形が複雑な分、樹脂を少しずつズラしながら重ねていくことが出来たのだろう。非常にキレイな仕上がりになった。

“My Customized Trefoil knot” by mvejar.

<http://www.thingiverse.com/thing:232536/#files>

“Prime Knot: 4_1 (figure-8 knot)” by DesignByNumbers.

<http://www.thingiverse.com/thing:216671>

“Trefoil Menagerie” by mathgrrl. <http://www.thingiverse.com/thing:234107>



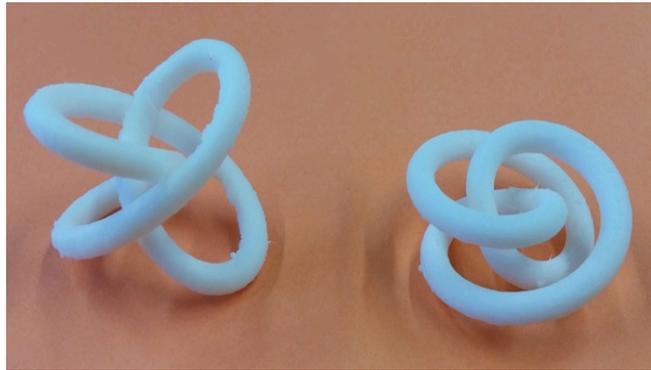
所要時間

5cm×5cm×3cm 約2時間

2cm×2cm×1cm 約30分

数学には、紐を結んだときの 結び方 の本質的な違いを研究する、「結び目理論」という分野がある。上の写真は結び目の一例である。結び目を授業などで学ぶ際、先生によっては実際に紐を使って結び目を作って見せてくれることもあるが、やはり紐という柔らかい素材を使うと、写真のような形状を維持することが難しいので、このようにプリンターで出力したものは非常に使いやすと感じた。

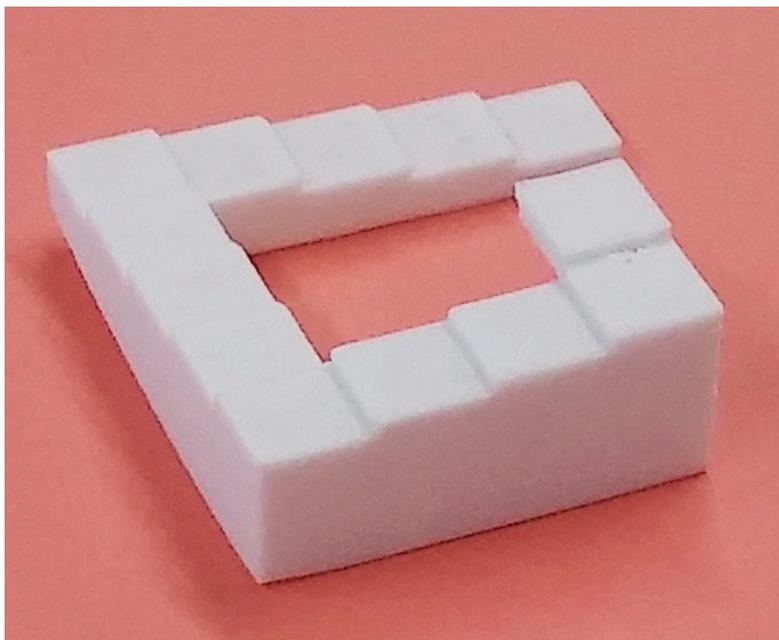
右の2つの白い結び目は、見た目の形は違うが実は同じ結び目（同じ結び方）である。つまり、切断せずに他方に変形することができるのだが、分かるだろうか？この形だけ見ると、複雑な形をし



ている上に天井の様になっている部分も多いので、綺麗に出力するのは難しいのではないかと思っていたが、意外にも非常にキレイな状態で出力された。全体的に曲がっていて天井の様になっている部分の面積が狭いので、少しずつズラしながら、無理なく出力できたのではないだろうか。

“Escher Stairs” by MicrosoftStore.

<http://www.thingiverse.com/thing:578554>

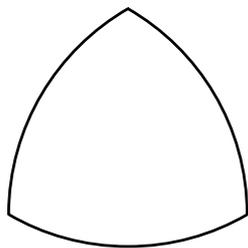
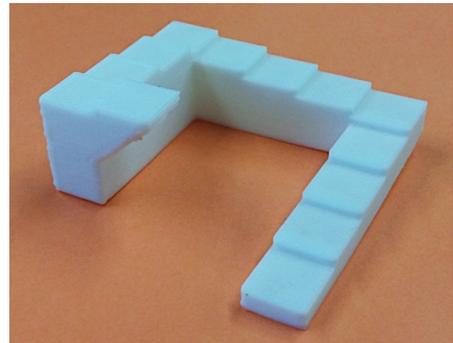


所要時間

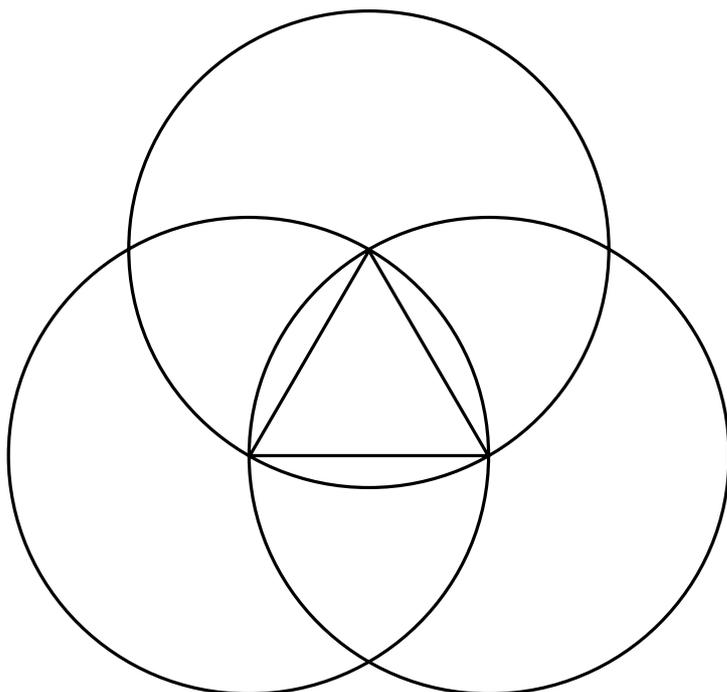
1 時間 1 1 分

5cm×5cm×2cm

これは不可能図形（不可能立体）と言われるものの一つを、3D プリンターを用いて立体化したもので、ペンローズの階段といわれる立体である。階段を登り続けていくと何故か最初の一番低い位置につながっているという非常に不思議な形になっている。実際にはこの説明のとおりには立体化することが出来るわけではないが、「そのように見える立体」であれば作ることができる。右の写真は別の角度から見たものである。実現出来ていないが、ある一定の角度から見ることで最初の写真のようになるのである。



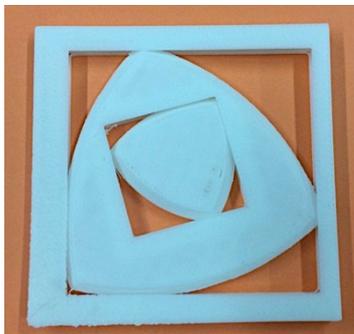
左の正三角形の各辺を膨らませたような図形はルーローの三角形と呼ばれる。これは定幅図形（差渡しの幅が常に一定となる図形）であり、高さが一定のまま転がすことができる。



ルーローの三角形は、左の図のように正三角形の各頂点を中心として、その正三角形の辺の長さを半径とする円弧を描き、その円弧をつなぐことによって描くことができる。

“Recursive Reuleaux Triangle for FDM” by ssd.

<http://www.thingiverse.com/thing:8921>



ルーローの三角形はどの方向にも幅が一定なので、正方形に内接しながら回転することが出来る。これは正方形を固定して、内側のルーローの三角形を動かすことができるようになっている。

所要時間 2時間37分 5cm×5cm×0.5cm

“Symmetric Spheroform Tetrahedron” by myxibrium.

<http://www.thingiverse.com/thing:408157>



所要時間 3個 52分

各辺 1.5cm の正四面体の面がふくらんだ形

これはルーローの三角形の定義をそのまま3次元への拡張したもので、ルーローの四面体と呼ばれるものがある。しかし、残念ながらルーローの三角形のように定幅図形と言う訳ではないようである。そこで、ルーローの四面体を改良して出来たものが次の立体である。

“Solid object of constant width Reuleaux Triangle Volume of revolution”

by Intentional3D.

<http://www.thingiverse.com/thing:193201>



所要時間

1 個 1 時間

底面部 直径 3cm

高さ 4cm

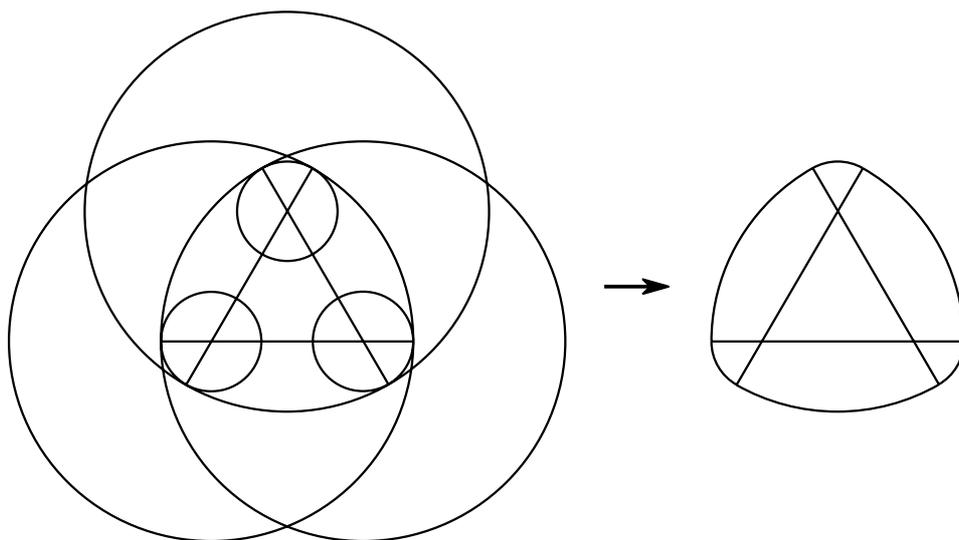


写真の左の立体はルーローの三角形を軸対称図形と考えたときの軸を中心にして回転させたものであり、定幅図形になっている。したがって、まるで球体を転がしているかのように一定の高さを保ったまま転がすことができる。写真の右の立体は、ルーローの三角形を拡張して角を丸くした図形(*)を軸対称図形と考え、軸を中心にして回転させたものであると推測できる。この立体も定幅図形になっているようだ。

出力した図形が土台に張り付いている部分は、土台を剥がしたときにあまりキレイではないので、これらのように厳密な長さ・高さが特徴となっている図形の場合、土台に触れている面積は可能なかぎり広くないほうが好ましい。

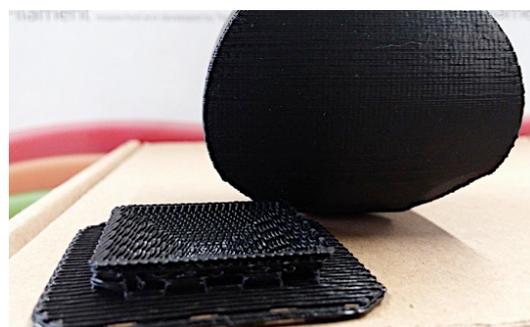
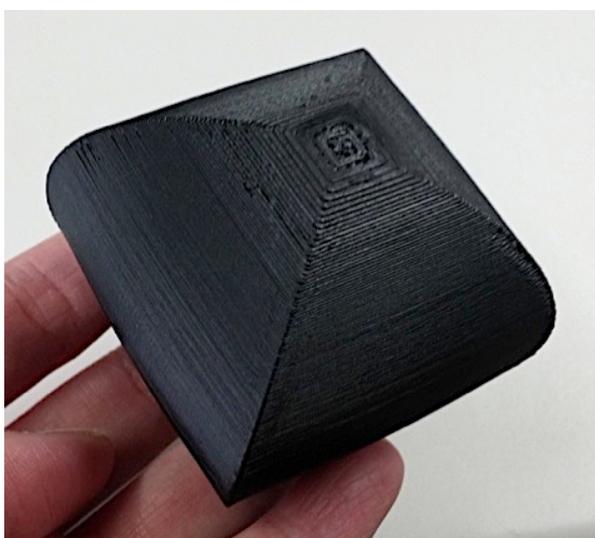
今回は、底面の部分が少し荒くなってしまった。

(*) 次の図が、ルーローの三角形を拡張して角を丸くしたものである。この図形も定幅図形である。



“Steinmetz solid” by dennedesigns.

<https://www.thingiverse.com/thing:906281>



所要時間

2時間14分

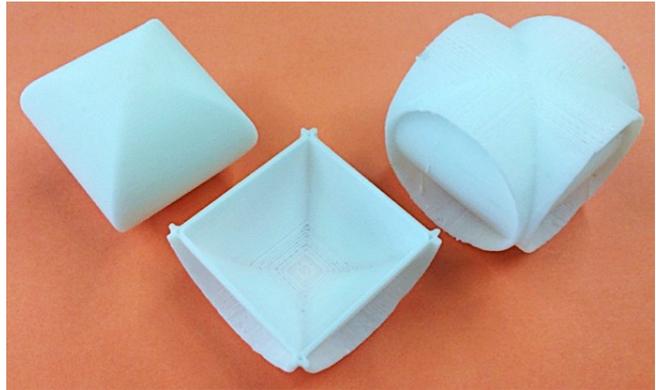
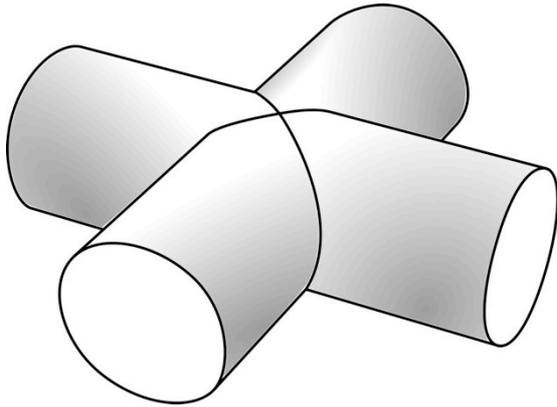
5cm×5cm×5cm



所要時間

1個 34分

3cm×3cm×3cm



これらは、2つの直交する円柱の共通部分の形である。積分の基本的な知識があれば、この図形の体積を求めることもできる。

“hart-bagel-cut” by George Hart. <http://www.thingiverse.com/thing:186372>



所要時間 6時間20分

直径 10cm×高さ 3cm

ベーグルに斜めに刃物を入れて、回しながらカットしたような図形であるが、

実はその切り口が、先にも紹介したメビウスの帯になっている。

実際にこの図形を見るためには、これまでは本物のベーグルをカットするような方法しかなかったが、3Dプリンターであれば切り口が崩れることなくキレイに見ることが出来る。右の写真のような2つのパーツの間に支えが出力され、それを完成後に取り除くことによって、左の写真のように2つのパーツが最初から絡まりあった状態が出来上がる。ただその支えの部分が奥に入り込んでいるので、取り除くのに少し時間がかかった。

内部をどの程度の樹脂で埋めるかについては、表面だけ (surface) だと、少し空気を入れたかのように全体的に膨らんだ形になってしまったことがあった。おそらくその日の気温や湿度が影響しているのだろう。そのため今回は少し内部を埋めた方が良くと判断したので、かなり時間がかかった。

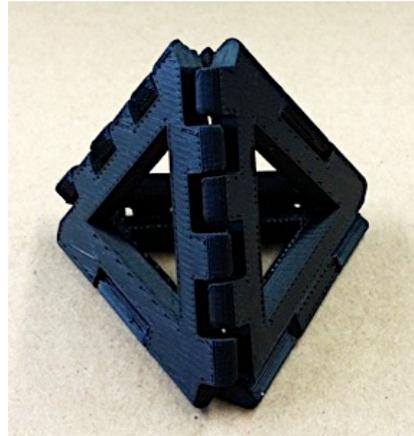
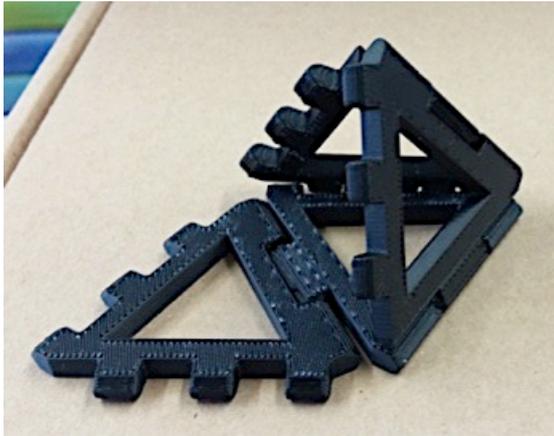
“Polyhedra - Hinged Nets and Snap Tiles” by mathgrrl.

<http://www.thingiverse.com/thing:185859>



所要時間 1時間30分 10cm×3cm×0.5cm

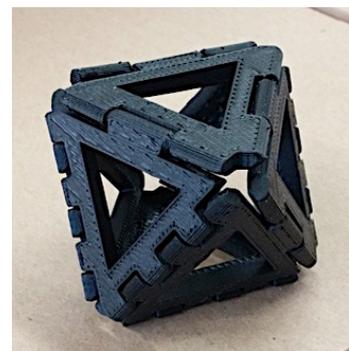
この写真は組み立てることができる四面体の展開図である。4つの三角形のパーツをバラバラに出力して、後から組み合わせたというわけではなく、最初からこの展開図の状態出力された。色々な物を試作していてやはりいちば



ん驚いたのは、ヒンジのある作品があまりにも簡単に出力できたことである。ヒンジの部分の凹凸がどのようにかみ合っているのかが3D データの中に組み込まれてあり、その通りに出力されるのでヒンジの部分がなめらかに動くのである。ただし、あまり小さいサイズで出力するとヒンジの部分がうまく稼働せず、壊れてしまう。ヒンジの部分がうまく稼働する空間を確保するために、ある程度の大きさは必要なようである。

“Polyhedra - Hinged Nets and Snap Tiles” by mathgrrl.

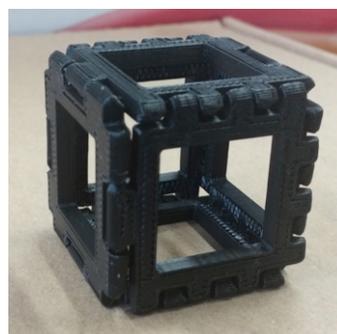
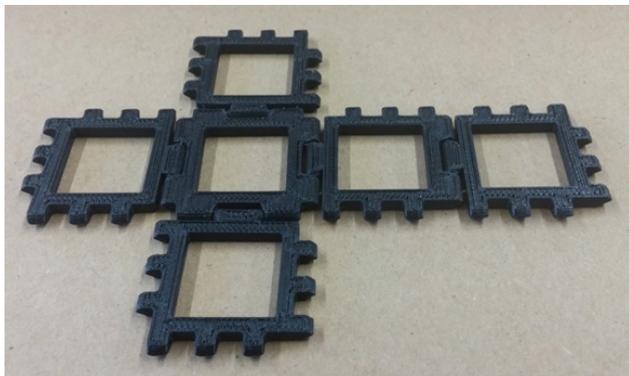
<http://www.thingiverse.com/thing:185859>



所要時間 1時間30分 15cm×15cm×15cm

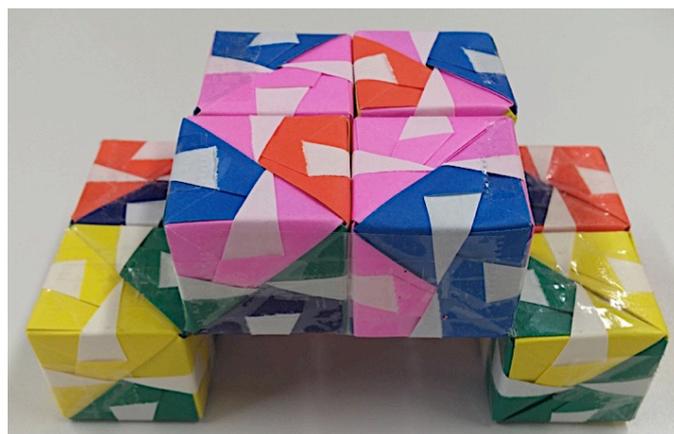
“Polyhedra - Hinged Nets and Snap Tiles” by mathgrrl.

<http://www.thingiverse.com/thing:185859>



所要時間 1時間30分 15cm×15cm×15cm

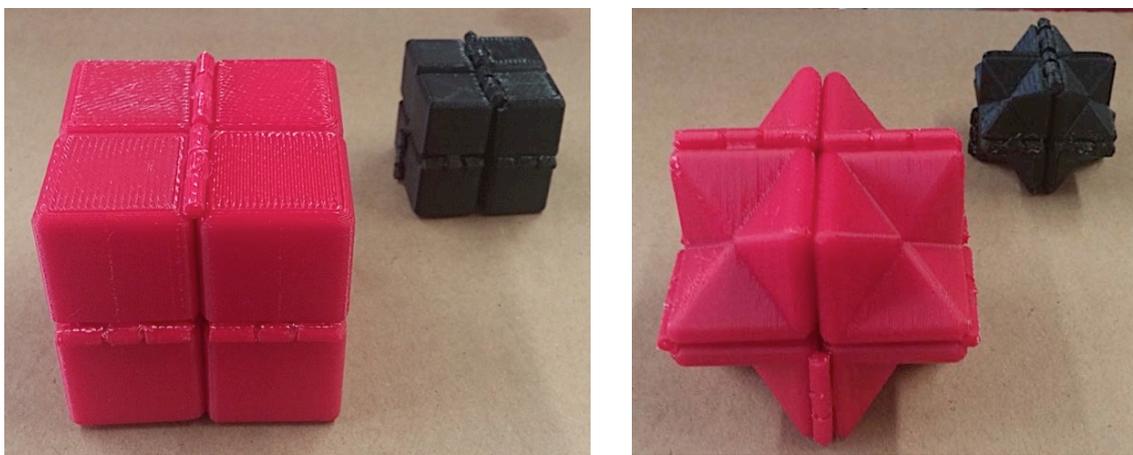
これらは全て展開図の状態では出力されるので、3D データをスライスする際に層の数は非常に少なくて済むが、ヒンジの部分もあり、展開図を組み立てるときに噛み合う部分も細かい形をしているので、1つ1つの層を出力するのに時間がかかるようであった。



これは先にも紹介した「無限に開く立方体」と言われるもので、8個の立方体がある規則でつながっていて、向きを変えなくてもパカパカと次々に「開いて」行くことができる、幾何学おもちゃである。

“Fidget Star” by mathgrrl.

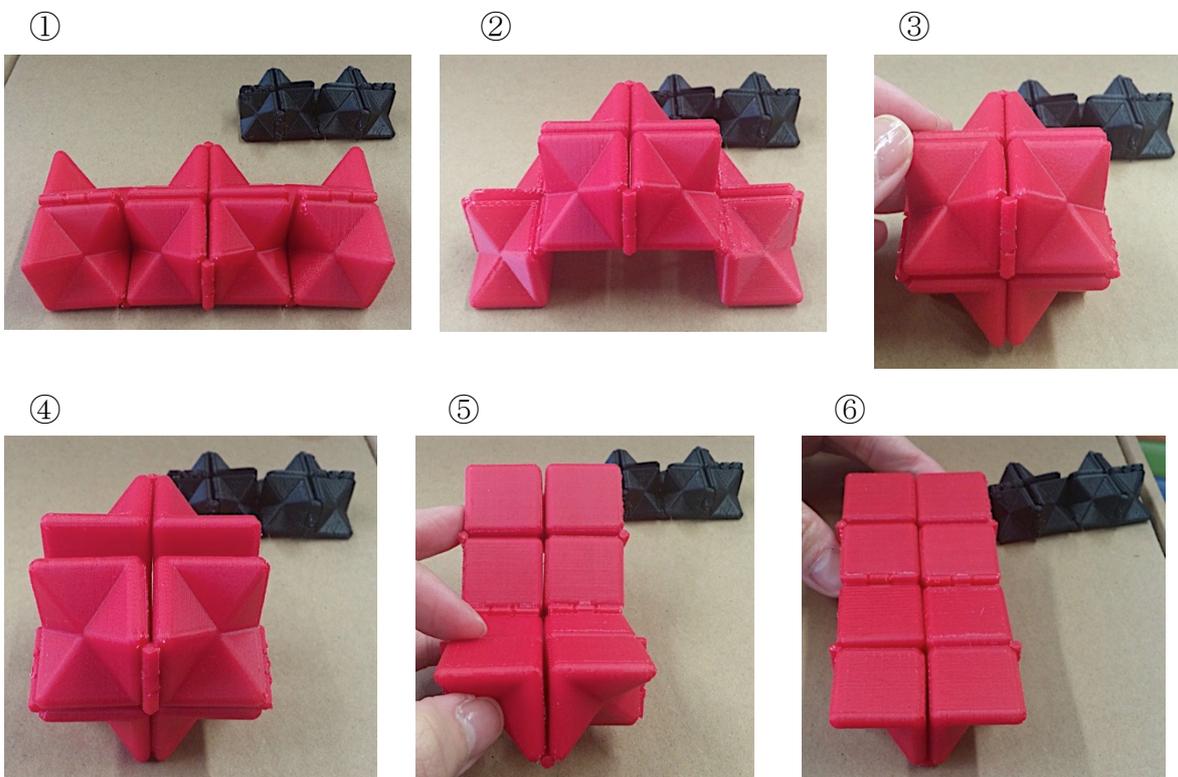
<http://www.thingiverse.com/thing:929504>



所要時間 3時間47分 5cm×5cm×5cm

これは吉本キューブと言われる有名な幾何学おもちゃであり、上の無限に開く立方体を進化させたようなものである。

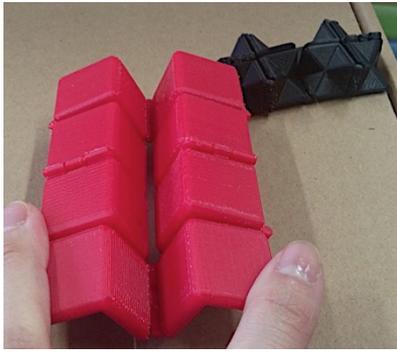
以下で実際に開いていく様子を見てみよう。



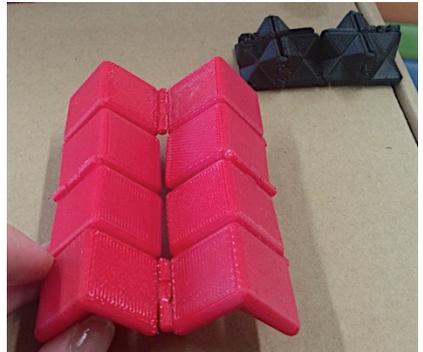
⑦



⑧



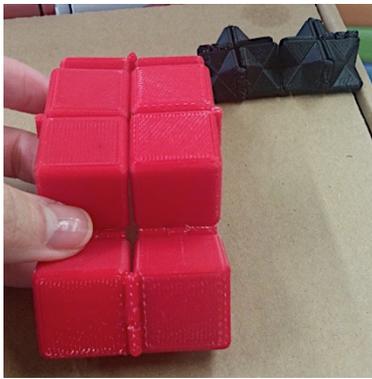
⑨



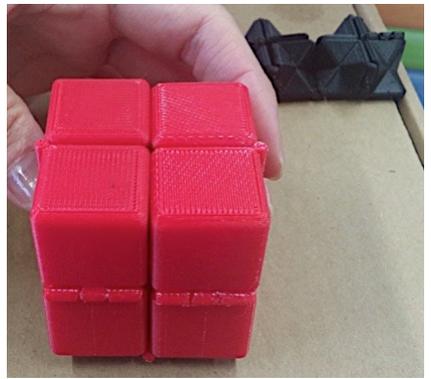
⑩



⑪



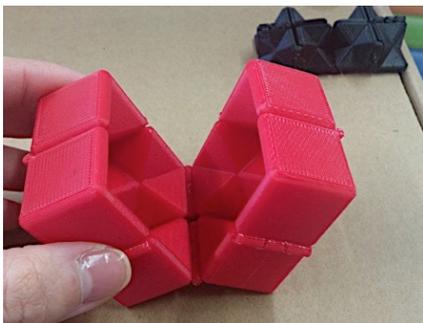
⑫



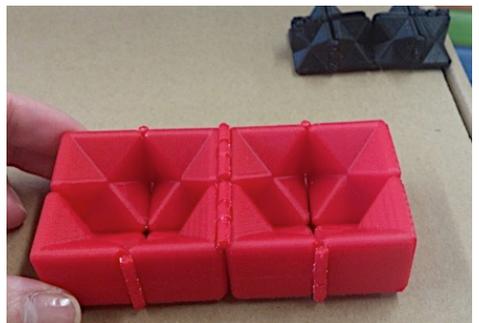
⑬



⑭



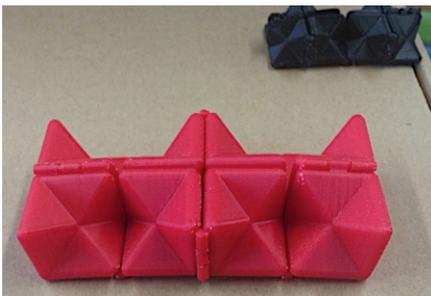
⑮

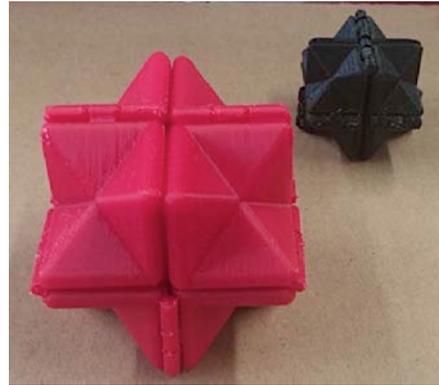


⑯



⑰

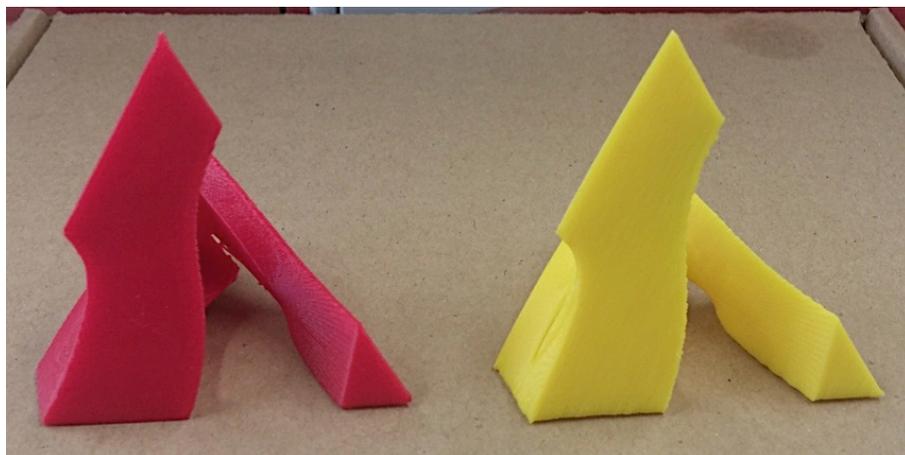




どんどん開いていく事によって、ただの立方体と星状菱形 12 面体が交互に現れる、非常に不思議なおもちゃである。写真の後ろにも見えているように、小さいサイズで出力しても完成品は出来た。しかしヒンジの部分が小さ過ぎたせいで強度が足りなかったようで、すぐに割れてしまった。

“hart-tetra-puzzle” by George Hart.

<http://www.thingiverse.com/thing:186372>



所要時間

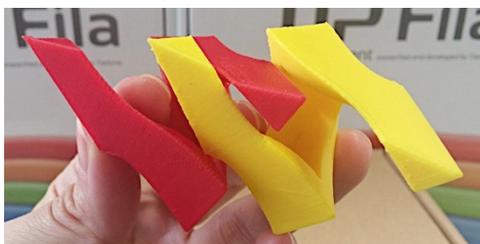
1セット 2時間

1辺 4cm の

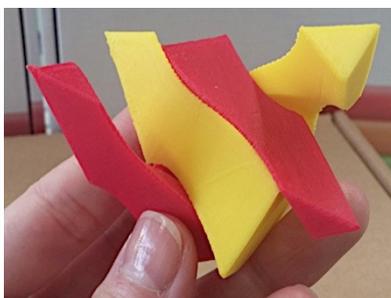
正四面体

これは正四面体を、先に出てきたベグルをカットするのと同じように、2つの合同な図形にカットしたものである。正四面体に戻るようにうまく組み合わせるのは、まるで知恵の輪のようでなかなか難しい。

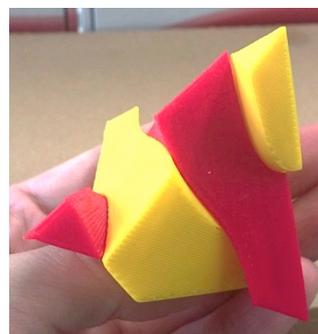
①



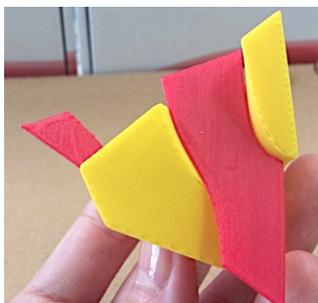
②



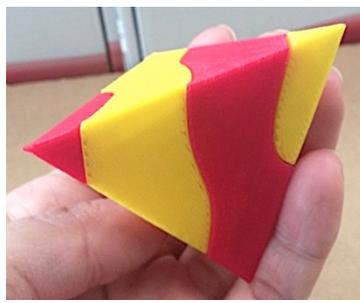
③



④



⑤



“Puzzle Sphere” by Emmett.

<http://www.thingiverse.com/thing:5862>



所要時間

5 時間

直径 5cm の球体

同じ形の 6 個のピースを組み合わせて球体を作るパズルである。隙間なくはめ込むタイプのパズルではないので隙間は空いているが、お互いの形がうまく引っかかり合うことで、床に置いて手を離しても球体がバラバラにならないようになっている。

ただし、床に置いた状態でコマのように回したり、回転をかけて空中に投げたりすると、遠心力によって簡単に全てのピースがバラバラになってしまう。



4. データの作成.

ここまでは配布されているデータを用いていたが、実際に自分で3D データを作成し、それを出力するということも試してみた。今回はフリーのソフトウェアを用いて平面の絵に厚みをつけることで3D データにした。

データの作成から出力までの流れは以下の通りである。

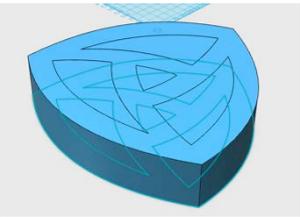
①Inkscape (ベクトル形式の画像を作成できる) で SVG 形式のファイルを作る。

②123D Design (PC や Web を使って 3D モデリングが出来る) で、先に作成した SVG ファイルに厚みを付けて STL ファイルを作る。

(123D Design では厚みをつける以外のこともできるが今回はしなかった。)

③そのデータを3D プリンターで出力する。

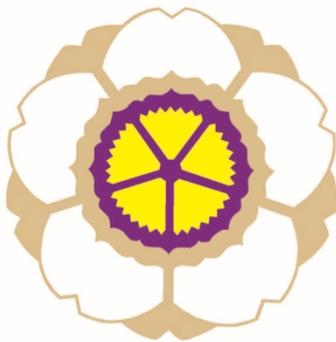
<奈良女子大学附属中等教育学校の校章>

- ①  まずは SVG 形式のファイルを作る。
校章のデータは既にあったので、Inkscape を用いて SVG 形式に変換。
- ②  次に①で作成したファイルに厚みを付ける。
もともとの校章では穴が空いている部分があるのでその部分に穴を開ける。
-  するとこのような3D のデータが出来上がる。
実際にこれを出力したものが以下である。
- 出力の際に全体のサイズや厚みは変更できる。

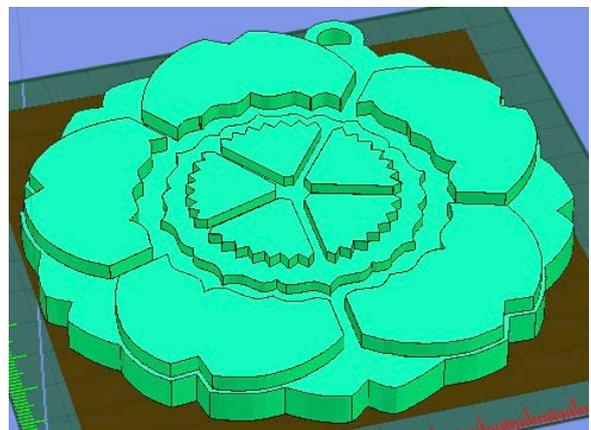
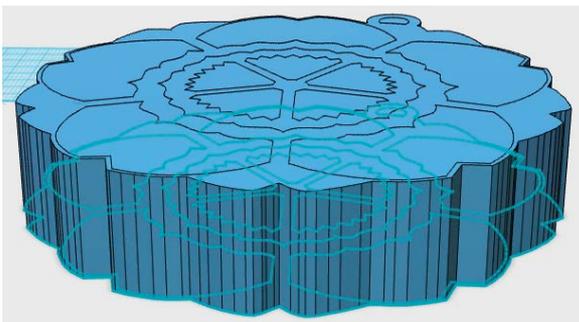


所要時間 13分 1辺 2cm×0.2cm

<奈良女子大学の学章>



左が奈良女子大学の学章ではあるが、現在使用している 3D プリンターは単色
でしか出力できない。そしてせっかくなので、キーホルダーのように使いたい
と思い、ロゴの上部に紐を通す穴を追加した。



これも同じように厚みを付け 3D データにして、さらに紐を通す穴を開けた。そしてこの奈良女子大学の学章は、先程の奈良女子大学附属中等教育学校の校章よりも模様が複雑であるが、このプリンターでは単色でしか出力できない。

SVG ファイルにおいて直線や曲線で隙間なく囲まれていた部分であれば、厚みをつけて 3D データにした後でもそれぞれの部分の高さを変更したり、削除したりすることができる。これによって凹凸を付けることで、模様を表現することにした。

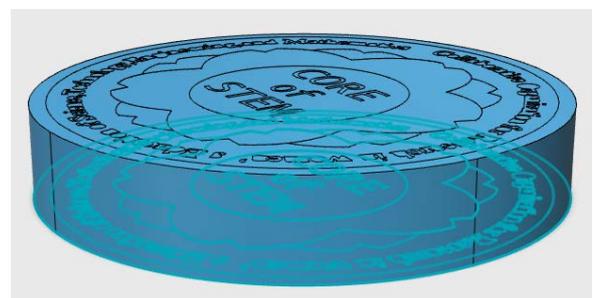
これが実際に出力したものである。



所要時間 (大) 1 時間 4 分 直径 5cm×0.5cm

所要時間 (小) 1 8 分 直径 2.5cm×0.3cm

<奈良女子大学 理系女性教育開発共同機構のロゴ>



最後に奈良女子大学 理系女性教育開発共同機構のロゴをプリンターで出力するのだが、このロゴには細かい文字がたくさん入っているので、前の2つのように単純に絵に厚みをつけるだけというわけにはいかない。

まず、このままでは周りにあるたくさんの文字がバラバラになってしまうので、これらの文字が全て収まるようにロゴをすっぽり囲む円を付け加える。ここから、模様や文字がキレイに浮き出るように凹凸をつけるために試行錯誤を繰り返した。





このように、凹凸の高低差を変えたり、穴をあけたり、色々なデータで試してみたが、どれも周りの文字が小さすぎて出力の際につぶれてしまった。

(直径約10センチ)

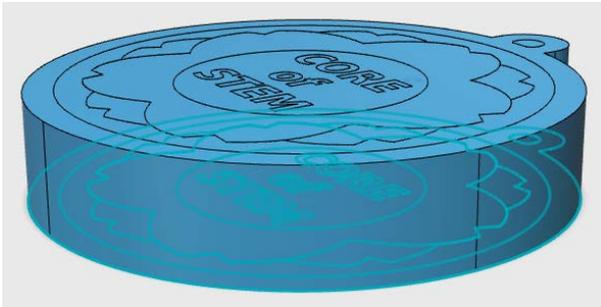


(直径約3センチ)



周りの文字が「CORE of STEM」と同じサイズになるように出力すれば、おそらくキレイに出力されるのであろうということは予測できるが、現在使用している3Dプリンターが非常にコンパクトなため、あまり大きいサイズのものは出力出来ない。おそらく直径15センチの物も難しいであろう。

そこで、ある程度小さくてもキレイに出力できるデータに変えてしまう必要があると考え、次のようにデータを変更した。



周囲の文字は小さいので削除して、再度出力してみることにした。また、先ほどと同じように紐を通す穴も追加しておいた。



最後に調節が必要となったのは文字の太さであった。

左のデータでは、文字が細くてはっきり出力できなかった（写真左）が、右のデータのように文字をボードにすると文字が潰れることなくはっきりと出力することが出来た（写真右）。

また、下の写真のように、同じデザインでも出力の際にサイズや厚みを変えることによって出来栄が大きく異なるということがあるようだ。



厚みがある方が、模様や文字がはっきりと浮き出てくる。

下は同じ色の樹脂で出力してサイズ・厚みによる違いを比較したものである。



左は直径約3センチで、真ん中と右は直径約5センチである。やはり小さいサイズだと文字が潰れてしまうのは、現在使用しているプリンターの精度に限界があるのだろう。かかった時間は奈良女子大学の学章と同じであった。

5. 樹脂について.

色々なデータで出力をしていると、何度か3Dプリンターのノズルが詰まってしまったことがあった。色を変えようとして樹脂を交換する際に折れてしまうなど、上手く取り出せずに残ってしまうことがあるようだ。ピンセットで取り出せない場合は熱を加えて新しい樹脂を上から入れ、溶かして押し出すことになる。そして何度か詰まって取り出してということを繰り返していく中で、何故か、毎回詰まりを起こすのは赤色の樹脂であることに気付いた。

小さなサイズのモデルを色ごとに出力したときにも同じことが起こった。



他の色では特に問題はなかったが、赤色の樹脂だけは土台からうまく剥がすことが出来ず、地面と接している部分が破れてしまったのである。おそらく色によって樹脂の顔料が異なり、強度にも差が出ているのではないかと思う。今のところ他の樹脂が持つ個性については何も分かってはいないが、データとプリンターの相性だけではなく、樹脂の個性との相性も、出力の際に多少影響しているのではないかと思う。

6. おわりに.

3Dプリンターはパソコン内でデータを作成し出力することができるので、数学とは非常に相性が良いのである。今回の様に単純に図形を形にするというだけではなく、様々なグラフなども出力することができる。立体であるはずの曲面のグラフも、これまでのように平面に描かれたものを見るだけではなく、実際に曲面を見て触ることができるのである。

数学においては、いま自分が何を考え、何についての計算を行っているのかわからなくなってしまうということがしばしば起きる。そのようなときに実物が目の前にあるというだけで、理解へのスタートを切ることができるという人は格段に増えるのではないかと思う。

いつの間にか、3Dプリンターの価格や精度が非常に現実的なものになってきている。今後は数学等を学ぶ教育現場だけではなく、様々な場面において3Dプリンターが活躍するようになってくるのではないだろうか。



参考文献

- 1) <http://www.georgehart.com/index.html>
- 2) http://home.wlu.edu/~dennee/math_vis.html#Instructions
- 3) <http://www.thingiverse.com/thing:234107>
- 4) <http://digifab.jp/>
- 5) <http://www.123dapp.com/>
- 6) http://www.geocities.jp/ikuro_kotaro/koramu/551_ms.htm
- 7) <http://kmoddl.library.cornell.edu/tutorials/02/>
- 8) <http://sysplan.nams.kyushu-u.ac.jp/gen/hobby/puzzle/roller/>
- 9) 門田 和雄著「門田先生の 3D プリンタ入門 何を作れるのか、どう役立つのか」講談社

LADy SCIENCE BOOKLET 10
3D プリンターで魅せる化学と数学の世界

2016年3月15日発行

奈良女子大学 理系女性教育開発共同機構

CORE of STEM

Collaborative Organization for Research in women's Education of
Science, Technology, Engineering, and Mathematics

〒630-8506 奈良市北魚屋東町

コラボレーションセンター Z207

TEL.&FAX 0742-20-3266

ladyscience@cc.nara-wu.ac.jp
