

## 1 歴史とともに原子を見ていこう

化学といえば「**原子**」です。

地球上のすべての物質は、なんらかの原子から成り立っているといっても過言ではありません。

水素や酸素、炭素などいろいろな種類の原子が存在しています。

原子は、小さな粒のようなものをイメージしてもらえればわかりやすいと思います。

どのくらい小さいかというと、ゴルフボールの数億分の1の大きさしかありません。

ちなみに、ゴルフボールは地球の数億分の1の大きさです。

原子がとても小さいことがわかりますね。

原子は小さすぎるため、人間の目では直接見ることはできません。

さて、そんな原子を、私たちはアルファベットを使った**元素記号**で表しています。

例えば、水素の原子はH、酸素の原子はO、炭素の原子はCで表されます。

原子を元素記号で表すと聞くと、難しく感じてしまうかもしれませんが、目に見えない音を音符で表しているようなものと考えれば理解しやすいと思います。

次に示したのは元素記号を並べた表で、「**周期表**」と呼ばれるものです。

表の中の\*1、\*2のところには、下にある別表の元素が並んでおり、現在までに全部で118種類の元素が知られています。

図 1.1

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	*1	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	*2	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og
		*1	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
		*2	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr



多すぎて覚えられないよ！

この本では十数種類ぐらいしか扱わないから安心してね



化学の教科書に載っていて、「水兵リーベー僕の船 (H, He, Li, Be, B, C, N, O, F, Ne) ……」と覚えましたよね。

例外はありますが、これらの元素記号は基本的に軽い順に並んでいます。

ちなみに、このなかには、人が作りだした元素もあります。

世界のあらゆる物質は、このような元素記号で表される原子で構成されています。

この考え方は、いまでは当たり前になっていますよね。

しかし、この考え方にたどり着くまでには、果てしなく長い道のりがありました。

その始まりは紀元前にまでさかのぼります。

古代ギリシャの哲学者たちは、「すべての物質は何からできているのか」という問題について、ひたすら考えてきました。

例えば、**タレス** (B.C.624頃–B.C.546頃) という哲学者は、すべての物質の根源は「水」であると考え、**ヘラクレイトス** (B.C.535頃–B.C.475頃) は「火」であると考えました。

そして**エンペドクレス** (B.C.490頃–B.C.430頃) という哲学者は、万物は火・水・空気・土の4つからできていると考えました。

いわゆる「**四元素説**」の始まりです。

すべての物質は4つの要素 (元素) からできているという考え方なので、四元素説です。

さて、ギリシャの権威ある哲学者、**アリストテレス**をご存じでしょうか？



**Aristotelēs**  
アリストテレス  
(B.C.384–B.C.322)

アリストテレスは、「火・水・空気・土の4つの元素は、さらに別の1つの「もの」から生じていると考えました。」

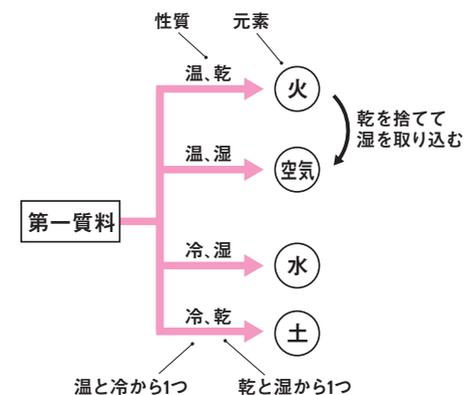
その「もの」は形がなく、定義できません。

永遠で無限の万物の根源、「**第一質料**」と呼ばれるそうです。

とても抽象的で難しい表現ですよ。

この**第一質料**というものに、「温・冷・乾・湿」の4つの性質のなかから2つが植えつけられて、「火・空気・水・土」の4つの元素ができる……というのが、アリストテレスの四元素説です。

図 1.2



図に示したように、温と冷から1つ、そして湿と乾から1つの性質が第一質料に植えつけられて、対応する元素が現れるという考え方です。

例えば、温と乾の性質が加わると「火」が、温と湿の性質が加わると「空気」が生じるわけです。

さらに、それらの性質を付け替えれば、ある元素から別の元素に変わることもできると考えました。

例えば、「火」から乾を捨てて湿を取り込めば、「空気」になるわけです。

ちなみに、この四元素説は次の図のように描くのが一般的です。

Chapter

# 7

小さくて軽くて  
大きなパワーをもつ電池  
リチウムイオン電池

2019年ノーベル化学賞

受賞者

ジョン・グッドイナフ

スタンリー・ウィッティンガム

吉野 彰

受賞理由

リチウムイオン電池の開発

## 1 世界を変えたリチウムイオン電池

2019年のノーベル化学賞は、「リチウムイオン電池」を開発した功績により、**ジョン・グッドイナフ先生**、**スタンリー・ウィットニングガム先生**、そして**吉野彰先生**に授与されました。



**John Goodenough** **Stanley Whittingham**

ジョン・グッドイナフ スタンリー・ウィットニングガム

(1922-)

(1941-)

**Akira Yoshino**

吉野 彰

(1948-)

この電池の優れているところは、小さくて軽いのに大きなパワーをもち、かつ充電が可能であることです。

このような利点がある電池が開発されたことにより、電気製品を小型化して持ち運ぶことが可能になったのです。

現在、スマートフォンやノートパソコンが普及しているのは、この電池のおかげといっても過言ではありません。

小さくて軽いにもかかわらずパワーがあるため、ドローンを飛ばすのにも有効です。

電気自動車や、ガソリンと電気走るハイブリッド車にも使われてい

ます。

この章では、この「リチウムイオン電池」の研究を解説していきます。



電池にも化学が関係しているんだね！

そうだよ。  
原子やイオンがたくさん登場するんだ。  
電池の基本から説明していくから、  
ついてきてね



## 2 電池の基本

本題に入る前に、まずは初期の頃の電池を例にして、その原理を説明していきますね。

1836年に発明された「ダニエル電池」という、初めて産業的に利用されたといわれている電池です。

基本的に電池は、金属を使って化学反応を起こし、電気を発生させています。

ダニエル電池では、「亜鉛」と「銅」の2種類の金属を使います。

おのおのの元素記号は「Zn」と「Cu」で、すでに登場していますよね。

片方の金属からもう一方の金属に向かって電子が動くというのが、電池の仕組みです。

電子のような電気を運びたものが動くのが、電気が流れるということでしたよね (p.42)。

じつは、「電子が動く」と、「電気が流れる」ことは、完全に同じ意味ではありません。

これについては後ほど説明しますね。



ちなみに、この電池の名前は、  
発明者の名前である  
「ジョン・フレデリック・ダニエル」に  
由来しているよ

それでは、ダニエル電池に使われている亜鉛 (Zn) と銅 (Cu) の話に戻りましょう。

ZnとCuは金属です。

鈴木・宮浦カップリングのところでも少し触れましたが、金属の原子は基本的に、プラスのイオンになりやすい傾向があります (3-3節, p.70)。

つまり、金属は電子を放出しやすいのです。

NaClを構成するNaもプラスになりやすかったですよね (Naも金属の原子です)。

というわけで、ZnもCuもプラスのイオンになりやすいのです。

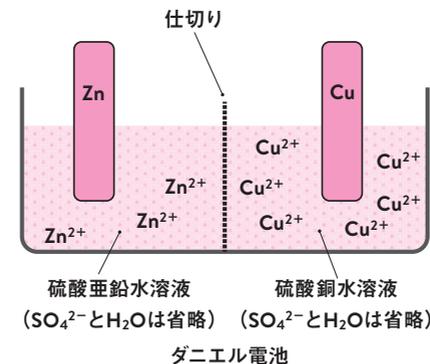
さらに、ZnはCuよりもプラスのイオンになりやすいという性質があります。

## Zn > Cu

—よりプラスのイオンになりやすい

このことを踏まえて、ダニエル電池を見ていきましょう。

図 7.1



図は、ZnとCuのかたまりが水溶液に浸かっている状態です。

電池に使われるこれらの金属を、一般に「**電極**」と呼びます。

Znの電極は、「硫酸亜鉛」を水に溶かした液体 (硫酸亜鉛水溶液) に浸かっています。

硫酸亜鉛の化学式は「 $\text{ZnSO}_4$ 」です。

一方、Cuの電極は、「硫酸銅」を水に溶かした液体 (硫酸銅水溶液) に浸かっています。

硫酸銅の化学式は「 $\text{CuSO}_4$ 」です。

水の中では、 $\text{ZnSO}_4$ は $\text{Zn}^{2+}$ と $\text{SO}_4^{2-}$ に、 $\text{CuSO}_4$ は $\text{Cu}^{2+}$ と $\text{SO}_4^{2-}$ に分かれています。

水に溶けるとバラバラになるのは、NaClが水に溶ける様子と同じです (p.39)。

NaClは $\text{Na}^+$ と $\text{Cl}^-$ に分かれていましたよね。

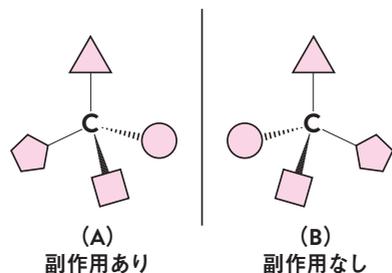
$\text{Zn}^{2+}$  (亜鉛イオン) と $\text{Cu}^{2+}$  (銅イオン) は、右肩に2+と表記されています。

$\text{Na}^+$ と比べると、2倍のプラスの電気を帯びているという意味です。

$\text{SO}_4^{2-}$  (硫酸イオン) は同様に2-と表記されていて、 $\text{Cl}^-$ と比べて2倍のマイナスの電気を帯びていますね。

NaClも $\text{ZnSO}_4$ も $\text{CuSO}_4$ も、おのおのを構成するプラスとマイナスのイオンの数字を足すと0になることがわかります。

図 9.19



薬を開発するためには、おのおののエナンチオマーが生体に与える影響を調べる必要があることがわかりますよね。

その後で、有用性が高く、危険性が低いほうのエナンチオマーを合成すればいいわけです。

この章で紹介するノーベル化学賞の研究内容が、片一方のエナンチオマーを優先的に化学反応で合成する方法です。

その詳細を、次の節で説明していきますね。

### 3 片方のエナンチオマーをつくる

さて、いよいよ本題である、片一方のエナンチオマーを合成する研究についてお話ししますね。

片方のエナンチオマーを化学反応で優先的に作り出すのは、かつては困難なことでした。

というのも、化学反応によって人工的に合成されたキラルな分子の場合、両方のエナンチオマーが1:1の割合で(ラセミ体として)できてしまうからです。

例えば、次の図に示した化学反応のように、不斉炭素原子をもたない分子から不斉炭素原子をもつ分子を合成したとしても、ラセミ体として

生成されてしまいます。

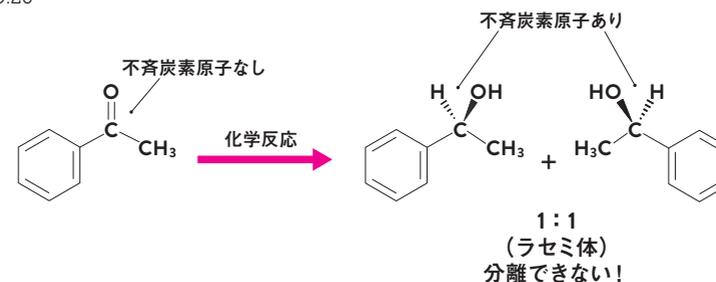
しかも、こうして得られたラセミ体を、おのおののエナンチオマーに分離するのは容易ではありません。

それらの構造はほとんど同じで、違いは鏡に映した関係にあるという点だけでした。

前節で説明したとおり、生物に対する作用は両者で異なることが多いのですが、融点や沸点、溶解度などの性質はまったく同じです。

したがって、例えば、固体と液体を分離する「ろ過」、沸点の差を利用して分離する「蒸留」(とくに分留といいます)、温度による溶解度の変化の違いを利用し、結晶化することで分離する「再結晶」などの化学実験では、ラセミ体を分離できないのです。

図 9.20



C=Oの部分が変換されて、  
水素原子が2つ結合する化学反応だよ

化学反応後は、  
不斉炭素原子が生じて  
キラルな分子になっている……!





そうだね。  
でも、ラセミ体として  
生成してしまうんだ

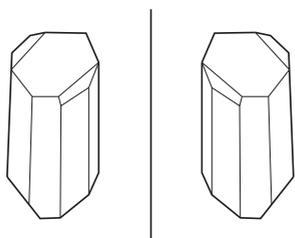
とはいえ、例外もあります。

じつは、おのおののエナンチオマーが別々に結晶化することにより、ラセミ体を分離することが可能になるケースもあるのです。

例えば、「酒石酸アンモニウムナトリウム」という物質のラセミ体は、条件によっては、おのおののエナンチオマーの結晶が別々に析出します。

1800年代、フランスのルイ・パスツール (1822-1895) は、これら2種類の結晶をピンセットで分けることにより、エナンチオマーの存在を示しました。

図 9.21



酒石酸アンモニウムナトリウムの2種類の結晶

なお、近年ではラセミ体を分離する方法が複数あります。

ただし、分離する工程に手間がかかるうえ、必要としないほうのエナンチオマーが無駄になってしまう一面もあります。

やはり、目的のエナンチオマーのみを得るためには、片方のエナンチオマーを化学反応によって合成する技術が必要になるわけです。

この研究が本格的に始まったのは1960年代でした。

そして開発された方法が、2001年のノーベル化学賞に輝いた研究の内容であり、ウィリアム・ノールズ博士、野依良治先生、バリー・チャー

プレス先生が受賞しました。

この方法は「不斉合成法」と呼ばれています。



William Knowles  
ウィリアム・ノールズ  
(1917-2012)

Ryoji Noyori  
野依良治  
(1938-)

Barry Sharpless  
バリー・シャープレス  
(1941-)

それでは、どのような方法を用いて、この化学反応を成功させたのかを説明していきましょう。

図9.20に示したとおり、通常の方法では、一方のエナンチオマーを優先的に作り出すことはできません。

ここでは、野依良治先生の研究を紹介しながら、不斉合成法について説明します。

野依先生は、BINAP (「バイナップ」と呼ばれています) という分子を利用して、不斉合成法の研究を行ないました。

次の図に示すように、BINAPには、エナンチオマーの関係にある2種類が存在します。

構造の中に不斉炭素原子はありませんが、BINAPもキラルな分子です。それぞれを (R)-BINAP、(S)-BINAP と呼びます。

このRとSは、アミノ酸のときのDとLのように (p.223)、おのおののエナンチオマーを判別する記号です。