

炭素とケイ素の不思議(14族元素)

松尾 司(近畿大学理工学部)

はじめに(元素とは?)

「元素」は物質を構成する最も基本的な要素であり、90種あまりが知られています(人工的につくられたものを含めると現在114種類です)。1869年にロシアの化学者メンデレーエフは、当時知られていた元素を重さ(原子量)の順に並べ、性質の似た元素が周期的に現れることをみつけました。これを「周期律」といいます。性質の似た元素を同じ列に並べたものを「元素周期表」と呼び、化学や物理学を学ぶ基本となっています。読者の皆さんも「すいへいりーべ、ぼくのふね・」のように、元素を原子番号の順に覚えたのではないのでしょうか?

元素はどのようにしてできるのでしょうか? 古くから「元素の創造」と「太陽の輝き」は人々の大きな関心を集めていました。実はこの2つの大きな謎はつながっているのです。現在、多くの化学者によって受け入れられている理論は、核反応(原子核が変化する反応で核融合や核分裂があります)によって元素が創造されるというものです。太陽では、水素の核融合のエネルギーによってヘリウムがつくられています。生成したヘリウムは次の段階の核反応の燃料となり、ベリリウムや炭素、酸素、ネオンといったように、重い元素(原子番号の大きな元素)が次々とできてきます。核融合は最も安定な核である鉄(原子番号26)の生成で止まり、鉄よりもずっと重い元素は「超新星爆発」で少しだけできると考えられています。現在地球にある元素、我々の身の周りにある元素、そして、あなたの体の中にある元素も、宇宙のどこかで誕生したあと、とても長い時間と空間を経てたどり着いたものなのです。

ゲゲゲの鬼太郎の歌詞に「たのしいな。たのしいな。お化けは死な〜ない〜♪」とあるのをご存知ですか? 「化学」の基本である「元素」は、核反応しない限り不変です。そういう意味では「元素は死な〜ない〜♪」とも歌えるでしょう。「炭素」も「ケイ素」も死にません。「化学(かがく)」のことを「ばけがく」と言うのも、あながち間違っていないのかもしれませんが(普通は、科学と化学を区別する時に「ばけがく」と言います)。

炭素とケイ素

元素周期表をながめてみましょう(「一家に1枚周期表(第8版)」(図1)、科学技術週間ホームページ(<http://stw.mext.go.jp/series.html>)からダウンロードできます)。周期表の横の列には「族」が1から18まで、縦の列には「周期」が1から7まであります。炭素は原子番号6、ケイ素は原子番号14です。炭素もケイ素も同じ14族元素であり、炭素は第2周期、ケイ素は第3周期なので上下に並んでいます。元素

記号はC(炭素の英語名Carbon)とSi(ケイ素の英語名Silicon)です(図2)。炭素もケイ素も「手の数」(何個の原子と結合をつくるか)は4つであり、互いによく似た性質が多くみられます。ところが、不思議なことに、自然界における炭素とケイ素の役割は大きく異なります。例えば、シリコン・マン(ケイ素生命体)はなぜ存在しないのでしょうか?(SFではときたま登場します)。



図1. 一家に1枚周期表(第8版)

炭素は生命体をつくる基本元素です。人体における元素の存在比(重量%)をみると、1番目は「酸素」、2番目が「炭素」、3番目は「水素」です。体の中にはたっくさんの水(H₂O)があります。それを除くと中心元素は炭素であることがわかりますね。炭素を含む化合物の多くは「有機化合物(有機物)」と呼ばれています。生物のことを有機体と呼ぶことにちなんでおり、鉱物と区別するために定義されました。一方、地殻(地表)の元素の存在比をみると、1番目が「酸素」、2番目に「ケイ素」、3番目には「アルミニウム」とな



図2. 炭素(左)とケイ素(右)。一家に1枚周期表(第8版)より。

っています。土の中には、砂の成分である二酸化ケイ素(SiO₂)、石英や水晶などが多く含まれています。岩石や鉱物の中にもケイ素は酸化物として豊富に存在しています。このように14族元素である炭素とケイ素は、それぞれ生物と鉱物を代表する元素であり、存在する場所や役割は大きく違

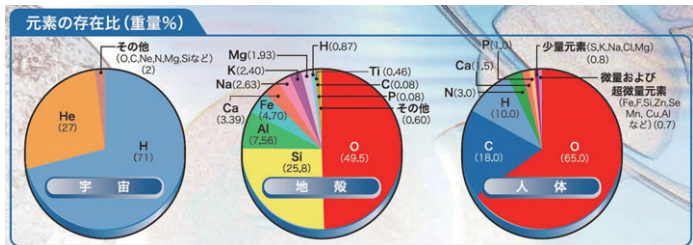


図3. 元素の存在比(重量%)。一家に1枚周期表(第8版)より。左から宇宙、地殻、人体。

っているのです。なお、炭素とケイ素がつながったもの(C-Si結合)は自然界には存在しません(隕石の中にわずかにみつかただけ)。炭素とケイ素の結合をもつ物質は、人類の英知で生み出した人工物質です。(筆者は、この言葉に感銘を受けて、有機ケイ素化学を研究するようになりました。)

ちなみに、宇宙全体の元素の存在比をみると、1番目の「水素」と2番目の「ヘリウム」でほとんど占められています。宇宙環境と地球環境との違いが、構成元素からものはっきりとわかりますね(図3)。

同素体

一つの元素からできあがる純粋な物質を「単体」と呼びます。単体の中には元素

同士のつながり方(結合)が異なるものがあり、これらを互いに「同素体」と呼んでいます。炭素の同素体は大きく2つあります。1つは「ダイヤモンド(金剛石)」です。ダイヤモンドでは、各炭素は他の4つの炭素と結合し、三次元につながった重合体をつくります。ダイヤモンドは天然で最も硬い物質であり、宝石として装飾品に使われるほか、工業用の研磨剤にも利用されています。もう1つの同素体は「グラファイト(黒鉛)」です。グ

ラファイトは二次元の層状(シート状)構造であり、各炭素は同一面内の3つの炭素と結合しています。層と層とは、「分子間力(ファンデルワールス力)」と呼ばれる弱い力によって重なり合っています。なお、グラファイトの1枚のシートは「グラフェン」と呼ばれ、2010年のノーベル物理学賞になりました。グラファイトは鉛筆の芯などに使われます。鉛(原子番号82)も14族元素ですが、「黒鉛」の成分に「鉛」は含まれないのでご注意ください。ダイヤモンドもグラファイトも天然に存在する元素鉱物です(図4)。

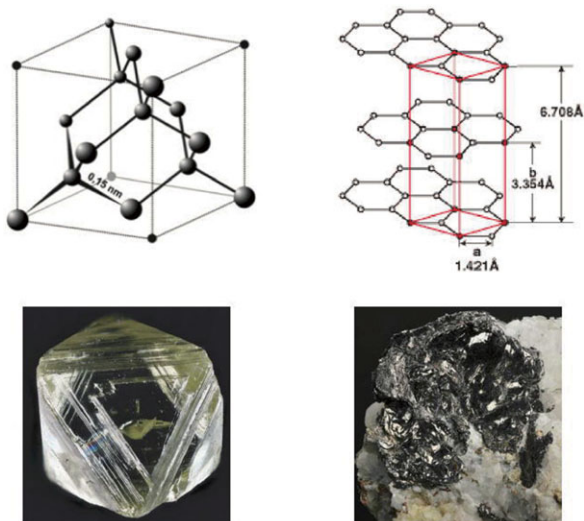


図4. ダイヤモンド(左)とグラファイト(右)。写真は田中陵二博士。

近年、炭素の第三の同素体として「フラーレン」や「カーボンナノチューブ」が研究されています。



図5. フラーレン「C₆₀」とサッカーボール(左)、カーボンナノチューブ(右)

フラーレンの代表例は「C₆₀」であり、サッカーボール型の分子として有名になりました。1996年のノーベル化学賞です。構造をよくみると、サッカーボールの黒色の部分のように五角形(五員環)同士は決して隣り合いません。一見、ただの球に見える分子もルールに基づいて精巧にできているのです。カーボンナノチューブは、六角形(六員環)が環状につらなった筒状の物質です。丈夫で軽く新素材としての応用が期待されています(図5)。あなたなら、中に何を入れてみますか？

ケイ素の同素体は、ダイヤモンド構造しか知られておらず、グラファイト構造は存在しません。(ごく最近、グラフェンのケイ素版である「シリセン」が研究され始めました。)自然界ではケイ素は酸化物として存在しており、天然にはケイ素の単体はみつかりません。高純度のケイ素単体(図6)は「半導体」としてパソコンなどに使われており、ハイテク産業に不可欠な素材です。結晶や非晶質(アモルファス)のケイ素は太陽光発電に広く利用されています。

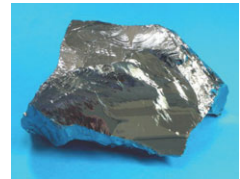


図6. ケイ素単体。光沢もつので「金属ケイ素」とも呼ばれますが、ケイ素は半導体であって金属ではありません。

炭素とケイ素が交互に並んだ「炭化ケイ素」もダイヤモンド構造をしており、耐熱性や耐久性に優れた「セラミックス」として利用されています。スペースシャトルの外壁にも使われており、大気圏突入時の高温から機体を守りました。

シリコン・マン？

シリコン・マン(ケイ素生命体)は存在するのでしょうか？第2周期の炭素は原子のサイズが小さく、炭素同士や同じ第2周期の元素である窒素や酸素との間で様々な結合をつくることができます。先に、炭素もケイ素も「手の数」は4つであると書きました。炭素では、互いに1つの手(単結合)でつながるだけでなく、2つの手(二重結合)や、3つの手(三重結合)でつながることもできます。炭素同士の単結合をもつ化合物を「アルカン」、二重結合をもつ化合物を「アルケン」、三重結合をもつ化合物を「アルキン」と呼びます。炭素と窒素の二重結合をもつ「イミン」や三重結合をもつ「ニ

トリル」、炭素と酸素の二重結合をもつ「ケトン」も安定に存在します。炭素が6つ環状に並んだ「ベンゼン」は「亀の甲」としてご存知の方も多いでしょう。単結合と二重結合を交互に繰り返し、実際は正六角形をしています。実はベンゼンの炭素のつながり方は、グラファイトの中の六角形と同じです。このように炭素は様々な結合を安定につくることができるため、とても複雑な生体反応や生命現象までをも支えることができ、ひいては人間のような知的生命体にまで進化することができたのだと考えられます。

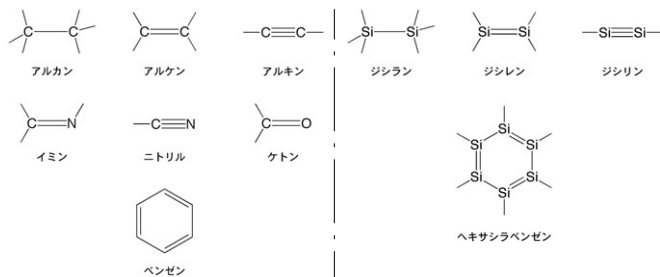


図7. 炭素の結合(左)とケイ素の結合(右)

では、第3周期のケイ素でも、多様な結合はつくれるのでしょうか？第2周期の元素と比べて第3周期の元素は原子のサイズが大きく、二重結合や三重結合は安定にはつくれないとされてきました。しかし近年、多くのケイ素化学者の長年の挑戦により、ケイ素同士の二重結合をもつ「ジシレン」や三重結合をもつ「ジシリル」が合成されました(図7)。ただ、空気中では不安定なものが多く、世の中で活躍するためには多くの課題が残されています。著者らは、2014年に世界に先駆けて空気中でも安定な「光るジシレン」(図8)を試薬製品化しました(東京化成工業株から販売中)。現在、ケイ素が6つ環状につながった「ヘキサシラベンゼン」の世界初合成を目指して研究しています。ケイ素の亀の甲はできるでしょうか？

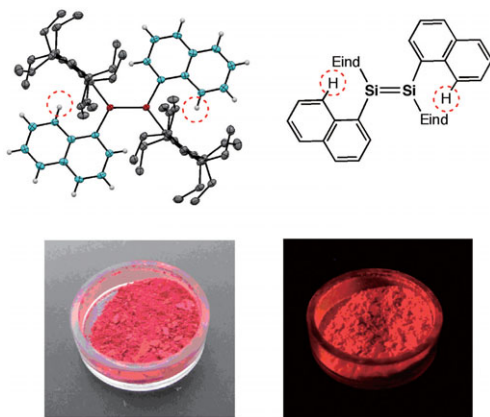


図8. 光るジシレン。写真は左が室内光、右は紫外線照射時。

二酸化炭素と二酸化ケイ素

生命体を考える上でもう1つ大切なことがあります。生命活動を維持するエネルギーをどのように獲得するか(代謝)です。我々は空気中の酸素を吸って二酸化炭素を吐きます(呼吸)。二酸化炭素(CO₂)は小さな気体分子ですので、すみやかに

体内から排出できます。我々は、有機物(食料や化石燃料)を「酸化」することで、日々のエネルギーを得ています。二酸化炭素はいわば「エネルギーの燃えかす」です。二酸化炭素は直線型の三原子分子であり、炭素を中心に2つの酸素と二重結合しています。これは、炭素と酸素の二重結合(C=O)が安定であるからです。

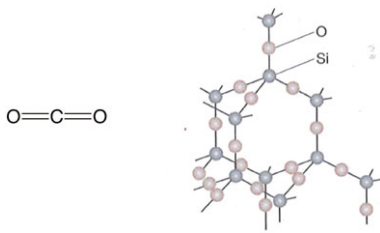


図9. 二酸化炭素(左)と
二酸化ケイ素(右)

ケイ素は酸素との相性がとても良く(「酸素親和性」といいます)、自然界には多くのケイ素酸化物(二酸化ケイ素)が存在します。しかし、ケイ素と酸素の二重結合(Si=O)は不安定であり、二酸化ケイ素(SiO₂)は二酸化炭素のように気体分子として存在することはできません。二酸化ケイ素は、ケイ素と酸素の単結合が三次元的につながった固体なのです。このため、ケイ素生命体が仮に存在するとしても、代謝の結果として二酸化ケイ素を排出するのは困難でし

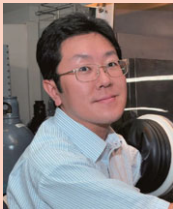
ょう。もし宇宙のどこかにケイ素生物がいるとしたら、きっと地球に住む我々には思いもよらない方法で、エネルギーを獲得するしかなさそうです。

ちなみに、水に溶ける「ケイ酸」を体に取り込む生物は、地球でも知られています。「ケイ藻」はケイ酸を使って美しい殻をまといます。また、稲の中にはケイ酸が多く含まれており、茎を丈夫にして風で倒れにくくなっています。これらの生物では、エネルギー獲得とケイ素は直接関連してはいません。しかし、広い意味ではケイ素生命体と呼べるのかもしれませんが。

おわりに

以上のように本稿では、基本的な「元素」の話、「元素」と「宇宙」のつながり、生物にとって重要な「炭素」と、同じ14族元素である「ケイ素」について紹介しました。皆さんがこれまで以上に「元素」に興味をもたれ、「化学」がより身近なものとなりました幸いです。

著者紹介 松尾 司(まつお つかさ)



近畿大学理工学部応用化学科、准教授。
北海道出身。1994年東北大学卒業。1999年筑波大学博士(理学)。分子科学研究所、理化学研究所を経て、2012年により現職。専門は元素化学。趣味は読書、音楽。応用元素化学研究室を主宰。ホームページ：
<http://www.apch.kindai.ac.jp/element-folder/index.html>