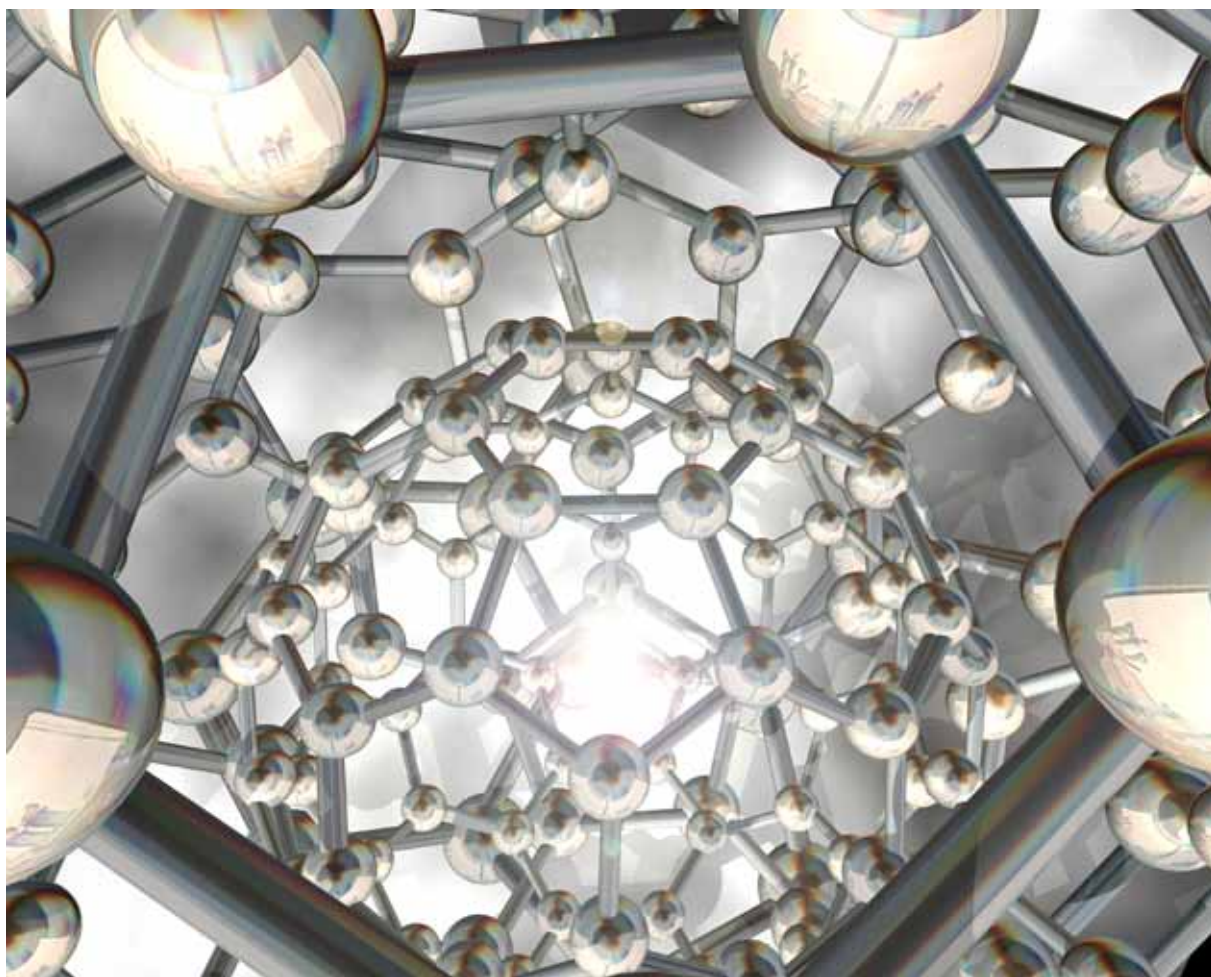


第 1 2 章 炭素の化学と化学反応

炭素は、すべての原子の中でも特別な意味を持っています。炭素は私たち生物が作られる構造の基本ですし、エネルギーとして利用されたりします。

化学というと、白衣を着た人たちが実験室で行うものと思いがちです。しかし、皆さんは日常生活の中で化学反応に出会っています。たとえば、コンロの火をつけるのも化学反応ですし、料理をするのも化学反応です。また、バスも燃焼という化学反応を利用しています。身の回りの鉄がさびるのも化学反応です。植物が育つのも二酸化炭素と水との化学反応を利用しています。私たちが食べ物を胃や腸で消化するのも化学反応ですし、それをエネルギーに変えていくのも化学反応なんです。

今回はなぜ炭素が特別であるのかを知ると共に、化学の基本的な反応の仕組みについて理解していきましょう。

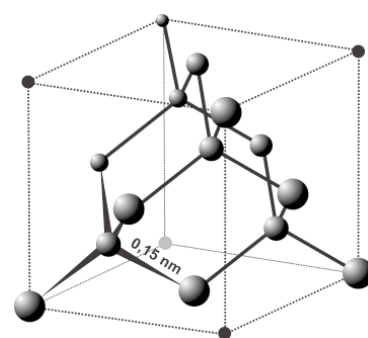


炭素の化学

すべての元素の中で、炭素は特別な位置を占めています。元素では、一般に周期表で下になるほど、中心からの距離が大きくなり、電子を引きつける力が弱くなっていくことは見ました。また、同じ列で、原子番号が大きくなるほど、有効核電荷が大きく、電子を引きつける力が大きくなっていくこともみましたね。この意味で第2列にある、ホウ素（3価）、炭素（4価）、窒素（5価）、酸素（6価）、フッ素（7価）は電子を引きつける力が強い元素と言えます。ただし、ホウ素では有効核電荷が3ですので、電子を引きつける力は強くなく、むしろはぎ取られてしまう元素になります。また逆に、フッ素では有効核電荷が大きく、電子を引きつける力が非常に強いこともみましたね。しかし、フッ素が共有できる価電子の数は一つしかありません。酸素は共有できる電子の数は二つになり、窒素では3つ、炭素は4つです。この意味で、炭素は、窒素などよりも共有した電子による引きつける力は弱くとも、4つの共有する足を持つといった特徴があります。つまり、より多くの原子と結合できるのです。また、炭素同士の結合も可能です。

最も特徴的なのは、炭素同士がすべて共有結合で結びついた**ダイヤモンド**です。これは、天然の物質としては最も硬い物質です。ダイヤモンドは、硬いため元に戻ろうとする力が強いので、振動の波が早く伝わります。熱も細かい振動ですので、**ダイヤモンドは熱伝導率が大きく、さわると冷たく感じるのです。**

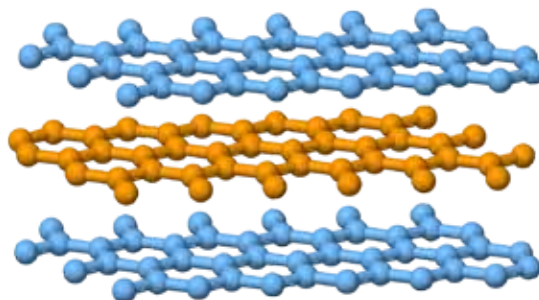
一方、地表では炭素のみが結びつくと**黒鉛（グラファイト）**となり、薄い層状になります。そして層同士がファンデルワールス力で結合した状態になります。鉛筆やシャープペンの芯に黒鉛が使われていますが、紙に押しつけると層がはがれ落ちて紙にグラファイトの層が移り黒くなるのです。このように、同じ物質でも原子の構造が異なることがあります。また、炭素は高温では、気体になります。このように、液体、気体、固体の様々な分子配置を**相**と言います。そしてこれらが熱や圧力によって移り変わることを**相転移**と言います。



強固な共有結合によるダイヤモンド



黒鉛 グラファイト



グラファイトの構造

層の間は弱い水素結合ではがれやすい

現代の錬金術、人工ダイヤモンド

相が移り変わる現象のなかで最もドラマチックな相転移の一つが、グラファイトとダイヤモンドの相転移でしょう。ダイヤモンドを燃やすと、二酸化炭素になることからダイヤモンドが炭素でできていることは19世紀から知られていました。また、酸素のない状況でダイヤモンドを熱するとグラファイトになることもわかっていました。この発見以来、ダイヤモンドを作るという錬金術が研究されてきました。しかし、黒鉛をダイヤモンドにする仕方は長らくわかりませんでした。

その錬金術のヒントは、ダイヤモンドの産地にあります。ダイヤモンドは地下150メートル以上の切り立ったような火山の噴火口で算出されます。そのため、そこに大きな圧力で閉じこめられて生成されたと考えられました。つまり、圧力によって平坦なグラファイトのシートがゆがめられ、熱による振動を利用してダイヤモンド構造に変わっていくのです。

1955年にアメリカのゼネラルエレクトリック社が、高温高压下で初めて人工的にダイヤモンドを生成することに成功しました。まさに、現代の錬金術です。ただし、炭素の配置を転換していくためには、高温高压下でも時間がかかりますので、触媒として鉄などの金属が加えら

れます。また圧縮のときに、空気中の窒素などが混合してしまいます。このため、ダイヤモンドに黄色など色がついたものになってしまいます。このような理由で、人工ダイヤモンドは、主に工業用として研磨やガラス切り加工用などに用いられています。ゼネラルエレクトリック社は、現在では1億5千万カラット（**1カラット=200ミリグラム**）もの人工ダイヤモンドを生産しています。

ただし、不純物が混入しない工夫をして、宝飾的なダイヤモンドとしての質を持ったダイヤの生成は現在では可能となっており、年間

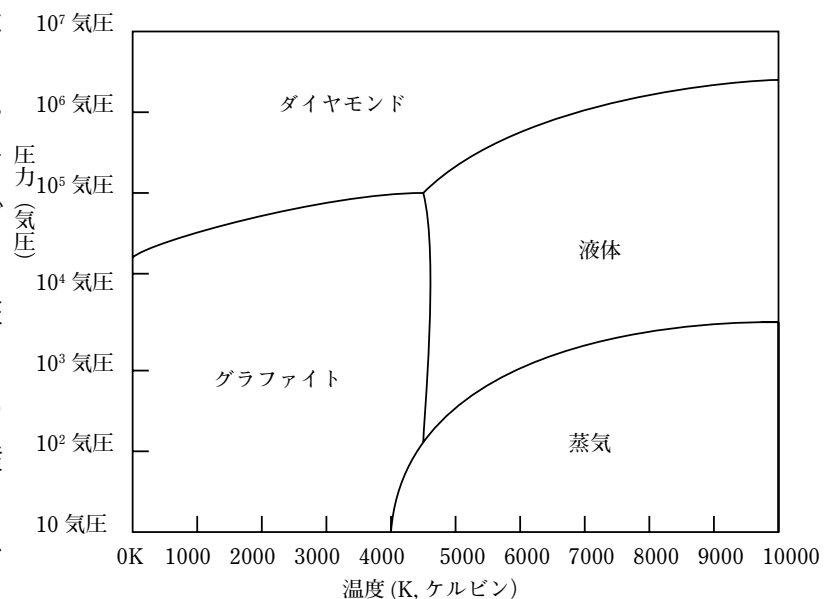
数千カラットの宝飾的ダイヤモンドが人工的に生産されています。



工業用ダイヤモンド
圧縮のときに空気中の窒素が
混入し黄色くなる。



Apollo Diamond, Inc
によって作られたダイヤモンド

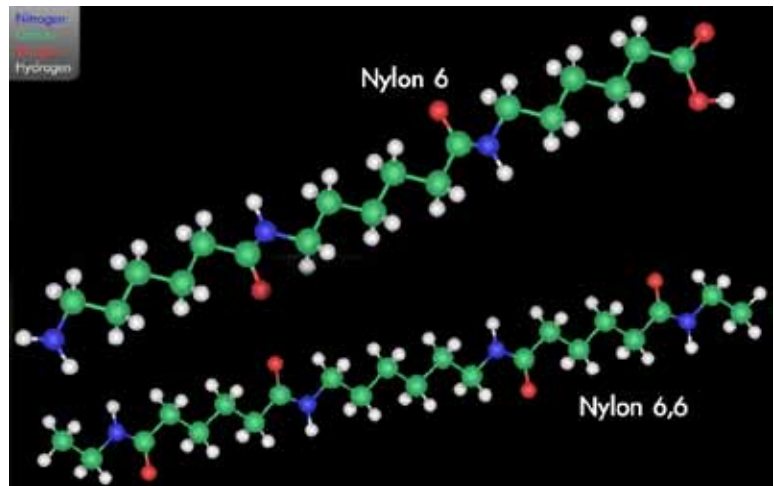


炭素の相

重合体（ポリマー）

小さなユニットの分子が一行につながり、非常に長い分子となったものを**重合体（ポリマー）**と言います。一つのユニットを**モノマー**と呼びます。ポリマーの分子は規則性を持って一行に並んだ構造をしています。生物の作る構造物でもポリマーがあります。たとえば、蜘蛛の糸や、蚕のまゆ、植物の繊維質であるセルロース、また私たちの髪の毛などが重合体です。生体の必須成分である、タンパク質も重合体なのです。

私たちの身の回りのプラスチック（合成樹脂）もまた、重合体です。それらは、原油に含まれる成分から作られます。重合体は紐のように折れ曲がります。そのため、プラスチックを熱すると、熱運動で溶けて絡み合った状態になります。これを冷やすと重合体が絡んだ形でその形を保ったままになります。ここ数十年で、プラスチックは商業的に最も成功している製品となりました。身の回りを見回しても、金属や木製の製品以外ほとんどは、プラスチック製品でできているのがわかるでしょう。



ナイロンの構造
典型的なポリマー

固



ウォーレス・カロザース 1896 - 1937 年

ウォーレス・カロザースは、すばらしい化学者であり、ナイロンの開発責任者であつた。また、合成ゴムを開発しました。

カロザースは、1896 年に、アメリカ合衆国、アイオワのバーリントンで生まれました。少年時代は道具や機械が好きで、よく実験をしていました。

1915 年にミズーリ州のターキオ大学に入学しますが、あまりに化学に優秀であるため大学卒業前に化学のインストラクターに任命されました。

その後、イリノイ大学に移り、そこで博士号取得と共に、その研究機関就職し、1926 年にハーバード大学の講師となります。その頃、デュポン社が直接には商売に結びつかないような基礎研究に補助を出す決定をしていました。そこで、デュポン社は、カロザースにデュポンの研究所で基礎研究をしてくれるように頼みます。1928 年にデュポン社の研究所に移ったカロザースは、研究所の長として活躍し、重合体の基礎研究では 10 年あまりに渡り重要な研究を発表し続けました。

ポリマーが巨大分子であることの理解を進めたのがカロザースが率いるチームでした。彼によりナイロンが最初に生成されたとき、べとついてぶよぶよしていたので使い物にならないと思われていました。しかし、カロザースの研究チームのジュリアン・ヒルが、遊びでこのナイロンの固まりに棒を差し込み引っ張ったところ、棒にナイロンの細い糸がくっついてきたのです。この糸は非常に強いものでした。ナイロンのこの性質は次のように説明されます。ナイロンができたときには、鍋の中でゆであがったスパゲッティーのようにナイロンの分子の方向がバラバラです。ナイロン同士が接触している部分が小さいために、分子間力が弱く柔らかいのです。一方、これをのばすと 1 方向に伸びて、ゆでる前のスパゲッティーの束のようになります。すると、分子同士が接触する部分が多くなり、分子間力が強く、非常に強い合成繊維となるのです。サイエンスには努力と共に、偶然の発見も必要となることもあるのです。

33 歳の若さにして、カロザースは世界的に有名な科学者となりました。1936 年には、民間の化学研究所としては初めて、アメリカ科学アカデミーの会員に選出されたのです。

彼は、詩を愛好するとともに、クラシック音楽が好きでした。不幸なことに彼は、鬱病に犯されており、1937 年に 41 歳の若さで自殺してしまいました。彼が開発に携わったナイロンが発表されたのは 2 年後のことです。彼は間違いなく一流の科学者であり、彼が生きていれば、ノーベル賞を受けていたことは間違いのないところでしょう。

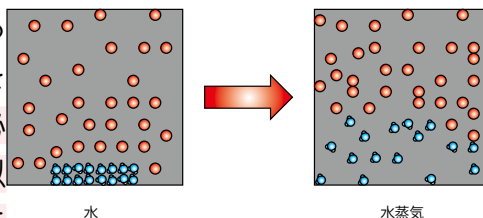


化学反応とは？

原子同士が分離したり結合したりする反応を**化学反応**と言います。化学反応について見る前に、なぜ化学反応が起こるのかを考えてみましょう。これには、エネルギーが関係します。電子は原子核の周りを回っています。そのため、運動エネルギーと引きつけられる力による位置エネルギーがあります。分子では、この電子の運動の位置が変わり、それに伴って位置も変わるため位置エネルギーが変化します。このような力は、電子の電荷と関係していますので、原子ごとに異なります。このため、分子をバラバラにして原子の状態にするのに必要なエネルギーは分子ごとに異なることになります。したがって、分子同士の結合の仕方を変えたときに、エネルギーの低い状態に移ろうとします。これはちょうど、坂を転がるボールと同じようなものです。また、外部から熱などのエネルギーを加えた場合には、エネルギーの低い結合からエネルギーの高い結合に変えることができます。

エンタルピーとは土地代を含んだエネルギー

実際の化学反応では、実は結合のエネルギーの差が外部に出ていく熱というわけではありません。この理由を考えてみましょう。エネルギー保存則である、熱力学の第一法則によると、内部のエネルギーの減少分は、外部への熱と外にした仕事の和です。お金の支払いにたとえば、現金の支出は、生活のための支出と資産の増加の和であると言ってもいいでしょう。化学反応におけるこの仕事とはどのようなものかを考えてみましょう。水が水蒸気となるには、水の分子同士の結合を外すためのエネルギーが必要です。しかし、それ以外にも必要なエネルギーがあります。それは、気体としての居場所を確保するのにエネルギーが必要であるということです。たとえば1モルの水は、気体になると20リットル以上の体積を占めます。もともとあった空気を押しのけてこの分を確保しなければならないのです。つまり、気体の状態の水が漏れているエネルギーは、分子の結合のエネルギーとその場所を持っている土地代があるのです。このため、結合に必要な正味のエネルギーは、結合のためのエネルギー以外に、その分子の居場所を作るためにする仕事分のエネルギーも必要になるのです。結合のエネルギーと場所を確保するためにした仕事の和を**エンタルピー**と言います。化学反応によって、分子数が変わり、分子のしめる体積が異なり、この土地代も異なることになります。そのため、化学反応ではエンタルピーの差が外部に出てくる熱となるのです。



放熱反応と吸熱反応

反応で熱を放出する反応を**発熱反応**と言います。反応前のエンタルピーより反応後のエンタルピーが小さい場合、そのエネルギーの差だけが熱として外部に放出されます。日常生活では様々なところで発熱反応が見られます。車がガソリンを燃焼しているのも発熱反応です。また、体の中でグルコースを化学変化してエネルギーを受ける過程の多くが発熱反応です。

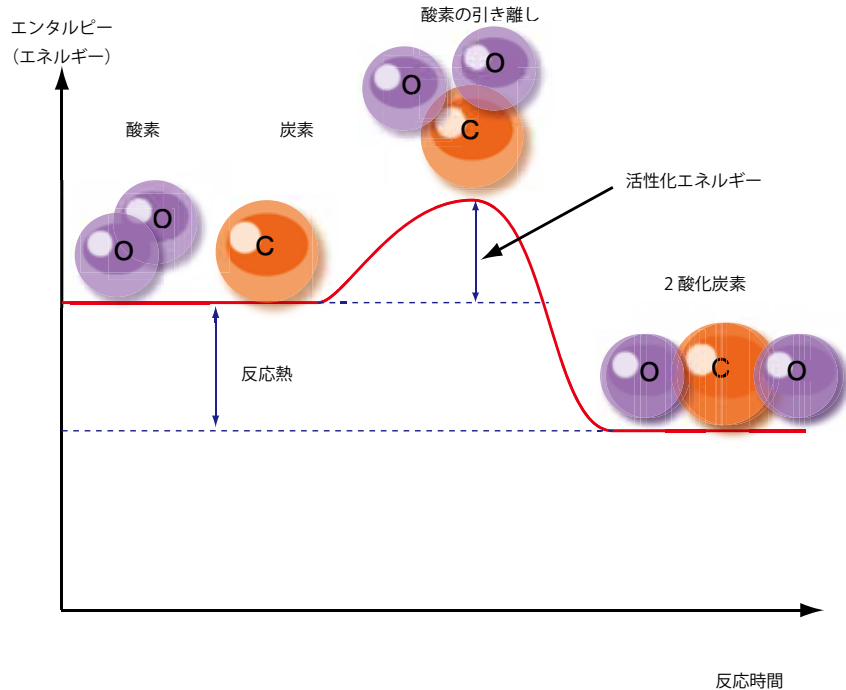
もし、結合の最終的なエンタルピーの方が、最初よりも高い場合には、外部からその分を熱として吸収することになります。このように外部から熱を得る反応を**吸熱反応**と言います。日常生活では料理で吸熱反応を行っています。たとえば、卵を焼くと、タンパク質の結合が熱によって解かれることによってタンパク質は変性して硬くなります。

活性化エネルギーと反応

化学反応では、反応が自然に進むことは少ないのです。たとえば、木はいったん燃え始めると燃え続けますが、最初に火をつけない限り燃えません。これはどうしてでしょうか？

炭素の燃焼では酸素と炭素がより強固に結びついた2酸化炭素の方が、エネルギーが低い状態になります

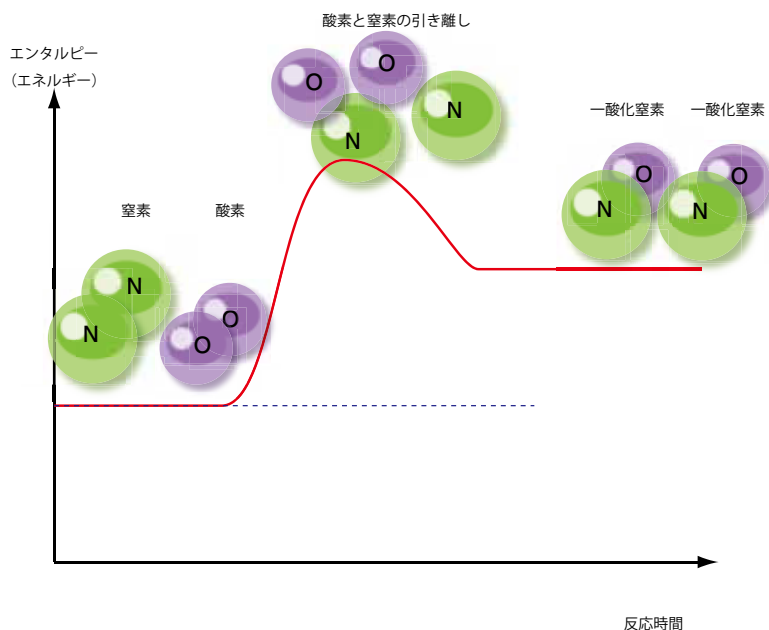
が、こうなるためには、一度酸素を引き離す必要があります。人間で言えば、暮らしやすいところに引っ越すと楽に暮らせるのはわかっているのですが、引っ越すには荷物をまとめたりすると言ったエネルギーが必要なのと基本的には同じです。反応を起こすための準備に必要な必要なエネルギーを**活性化エネルギー**と言います。酸素



分子を引き離すには、分子同士の激しい衝突か、光の吸収によって行われます。この場合、一つの組がいったん2酸化炭素になると、そこから光として反応熱が放出されます。この光を吸収した酸素は活性化エネルギーを得て反応が起こり、これを繰り返すことで次々に反応が進んでいきます。

次に窒素分子と酸素分子

の反応を見てみましょう。窒素は3つの共有結合で強く結びついているためにこれを引き離すのには多くのエネルギーが必要です。したがって、非常に高温でエネルギーの高い光が必要になります。そうして生成した一酸化窒素は元比べて高いエネルギーを持ちますので、この反応は吸熱反応となります。この反応は、ディーゼルエンジンなどの



高温高压での反応や、空气中で雷によっても起こります。

触媒とは？

化学反応のときには、分子を組み替えるために活性化エネルギーが必要でした。このため、反応によっては非常に高温にしたり、高圧にしたりする必要があります。しかし、何か他の物質が反応を起こして分子の分離を起こさせることによって、化学反応を円滑に行うことができる場合があります。このように、化学反応を助ける働きをする物質を**触媒**と言います。言葉だけでは抽象的でわかりにくいので例を見てみましょう。

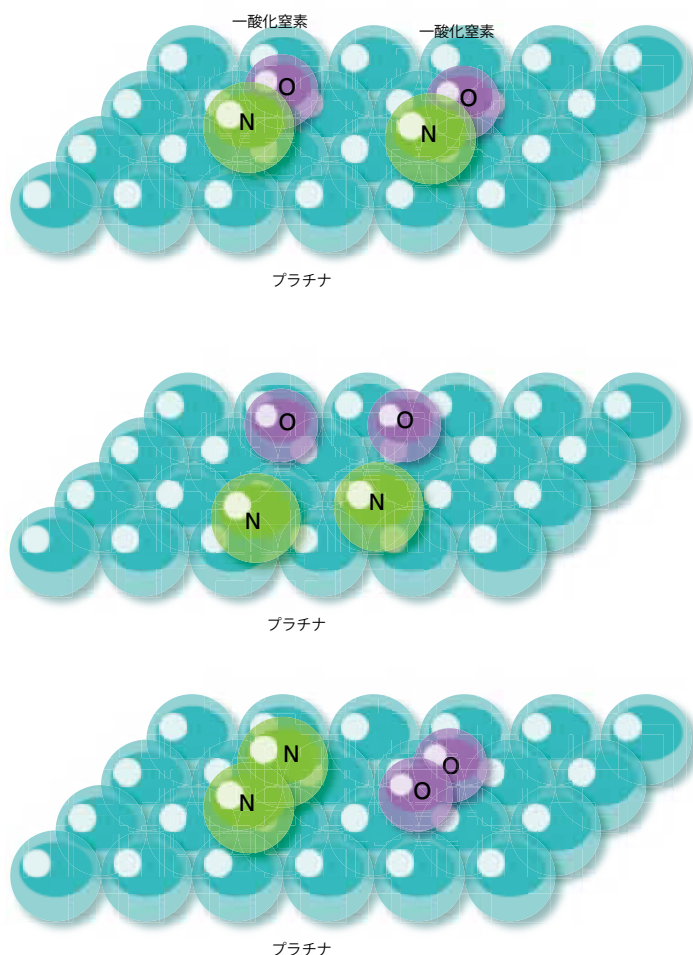
窒素分子は3重結合のため非常に強力に結びついているため、これを分解するには大きなエネルギーが必要です。しかし、ディーゼルエンジンなどの高温、高圧下では、窒素が分解して酸素と結びつき一酸化窒素 NO が作られてしまいます。これが、スモッグなどの原因となります。

このため、ディーゼルエンジンにはこれを取り除く装置が義務づけられています。これには、プラチナやパラジウムが触媒として使われます。

一酸化窒素の窒素と酸素はプラチナによって、窒素と酸素を結びつける力よりも強く引きつけられます。このため、窒素と酸素の結合が解け、窒素と酸素がプラチナ上を移動するようになります。しかし、窒素原子同士が近づくと、プラチナよりも強い力で結合し、窒素分子や酸素分子に変わります。そしてこれは非常に安定な分子なので触媒に引きつけられる力は弱くなり、空気中に出て行きます。

プラチナやパラジウムでは同様にして、一酸化炭素も二酸化炭素にすることができます。このようにして、排気ガスの中の有害な窒素酸化物や一酸化炭素を除去できるのです。このように、**触媒によって反応の活性化エネルギーを下げる**ことができます。

触媒としては、上で見たような金属だけでなく様々な分子が反応ごとに用いられます。また、商業的には、良い触媒があれば、反応のために高温高圧にする必要性が減少するので、化学製品のコストが安くなります。このため、**触媒の開発は化学産業にとって重要な**のです。



日常生活で良くある反応

日常生活では様々な化学反応が起こっています。たとえば、細胞の内部では化学反応によって生命を維持しています。また、人間が作り上げた反応もあります。しかし、日常生活で目に見える範囲では化学反応はそんなに多くありません。ここでは、日常的に良く見る化学反応だけを見ていきましょう。

酸化還元反応とは？

大気は酸素が20パーセントほど含んでいます。このため、この酸素が関係する反応が多く起こります。酸素は電子を奪い取る力が強いのです。古来酸化とは酸素と結びつく反応を言いましたが、酸素と同じ働きをする他の原子もあるので、電子を奪い取る反応を**酸化**と言います。

たとえば、鉄は酸化してさびた状態になります。これを化学式で表すと、



となります。鉄は酸素に電子を奪い取られたので酸化したということです。ただし、空気中では鉄はあまりさびません。皆さんも鉄は水に触れるとさびるのを経験していますね。これは、水の中に



鉄がイオンとして溶け出すことによって、酸素と結合しやすくさびたボルト なるからです。つまり、鉄の酸化では、水が触媒として作用しているのです。

使い捨てカイロは、鉄の酸化のときに出る熱を利用しています。つまり、鉄を水分と塩分とにより効果的にさびさせるときに出る熱を利用しているのです。

燃焼は、もっと素早い酸化反応を言います。炭素と水素の化合物を**炭化水素**と言います。この炭化水素は、炭素も水素も酸素と結合しますので燃料として便利です。

ナチュラガスはメタン CH_4 が主成分であり、炭素は酸素と結合し2酸化炭素になり、水素は酸素と結合して水となります。つまり



となります。

酸化の反対の反応が**還元**です。電子を受け取り、電荷が減少するのを還元と言います。

数千年も前から、人類は酸化した状態の鉄を含む鉄鉱石を還元する術を知っていました。酸化鉄に炭化物を加えて酸素が欠乏した状態で2000℃以上に熱し、鉄から酸素を奪い、その酸素を炭素が受け取ります。このようにして、鉄を作り出したのです。

ある分子が電子を奪うと必ず電子を放出した分子があるのです。そのためある分子が酸化されると還元される分子もあり、酸化と還元は同時に起こります。この意味で、電子の受け渡しの反応を**酸化還元反応**と言います。

酸化還元反応は、生命にとってとても重要です。動物は炭素や水素を酸化してそのときのエネルギーを利用します。一方、植物では2酸化炭素の炭素を光合成で還元して、炭水化物などを作っています。

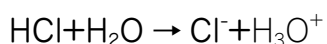
酸と塩基反応

酸というのは日常用語になっています。酸味があるというのもそうですね。酸は金属を朽ちさせたり、なめると酸っぱかったりします。

科学的な酸の定義は、**酸**とは水中で、水素イオンを放出するものです。レモンジュースや食酢などは弱い酸です。一方、塩酸や硫酸などは強い酸で、高い割合で水素イオンを放出します。もっとも水素イオンというのは、水素の原子核で非常に小さく、水中では水分子のマイナス極と結合した状態でいます。つまり、 H_3O^+ という**ヒドロニウムイオン**となります。しかし、慣例上これを H^+ と書き、水素イオンと言うことが多いのです。

また、**塩基**とは水素を受け取る分子です。アンモニアは塩基の典型です。また、パイプクリーナーなどは強い塩基です。

たとえば塩酸 HCl を水に



となります。つまり塩酸中の塩素は、水のマイナスに帯電した部分の電気的力に

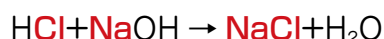
負けて、水素原子を奪われるのです。この場合、塩酸が酸であり、水が塩基です。

一方、水にアンモニアを入れると、アンモニアのマイナス電荷部分に水の水素が奪われて、**水酸化物イオン**とアンモニウムイオンとになります。この場合今度は、水が酸であり、アンモニアが塩基です。

このように、酸と塩基は分子に固有のものではありません。相手分子との相対的な違いでどちらが水素イオンを失うかが決まるのです。対人関係での強弱と同じところがあります。この意味で、酸と塩基というのは分子の行動によって決まっていて、分子に固有の概念ではないのです。

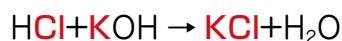
日常用語では塩というと、食塩、塩化ナトリウムを意味します。しかし、化学では、**塩(えん)**とは、酸と塩基を混ぜたときに生成される生成物を言います。

たとえば、塩酸 HCl と水酸化ナトリウム NaOH を混ぜると



となり、塩化ナトリウムができます。同様に、

塩酸と水酸化カリウムを混ぜると、塩化カリウムと水が生成されます。



酸と塩基の反応は酸の度合いを薄めるので**中和反応**とも呼ばれます。



化学反応と熱力学の第2法則

化学反応は一方通行のことが良くあります。たとえば、炭素が燃えて2酸化炭素になりますが、自然には2酸化炭素が炭素に戻ることはありません。また、発熱反応ならエネルギーの低い状態に移るということであるので、化学反応は発熱反応なら自然におけると短絡的に考えがちですが、化学反応の中には吸熱反応もあり発熱の問題だけでは化学反応は説明できません。

実は化学反応が進む方向は、熱のエネルギーは乱雑に分散していく方にすすむという熱力学の第2法則と関係しているのです。熱力学の第2法則は、自然界では自然に乱雑さが増す方向に進むということでした。そして、この乱雑さの目安をエントロピーと言いました。つまり、自然界の系では、エントロピーが増大する方向に向かうということです。

分子のそれぞれの状態に対して乱雑さを示すエントロピーがあります。また、5章で見たように、熱もまたエントロピーになります。つまり、熱を吸収すると分子の運動が活発になり乱雑さが増し、熱を放出すると逆に乱雑さが減るのです。したがって、状態のエントロピーに加えてこうした熱によるエントロピーまで含めると、化学反応の進む方向は次のように言うことができます。

エントロピーの増大する方向に化学反応が進む

もし、自然に化学反応が進まなくても、外部からの熱もエントロピーを増大させます。したがって、外部からエネルギーを入れることで反応を進ませることもできるのです。

このエントロピーは、先に述べたエンタルピーと名前が似ていて混同しやすいので注意が必要です。エンタルピーはそれぞれの持つ、状態まで含めたエネルギーであり、エントロピーは乱雑さの指標を言い、エンタルピーだけではエントロピーは決まりません。



物質の状態のエントロピーと熱によるエントロピーを含めるとエントロピーが増大する方向に化学反応が進む

拡散と乱雑さ

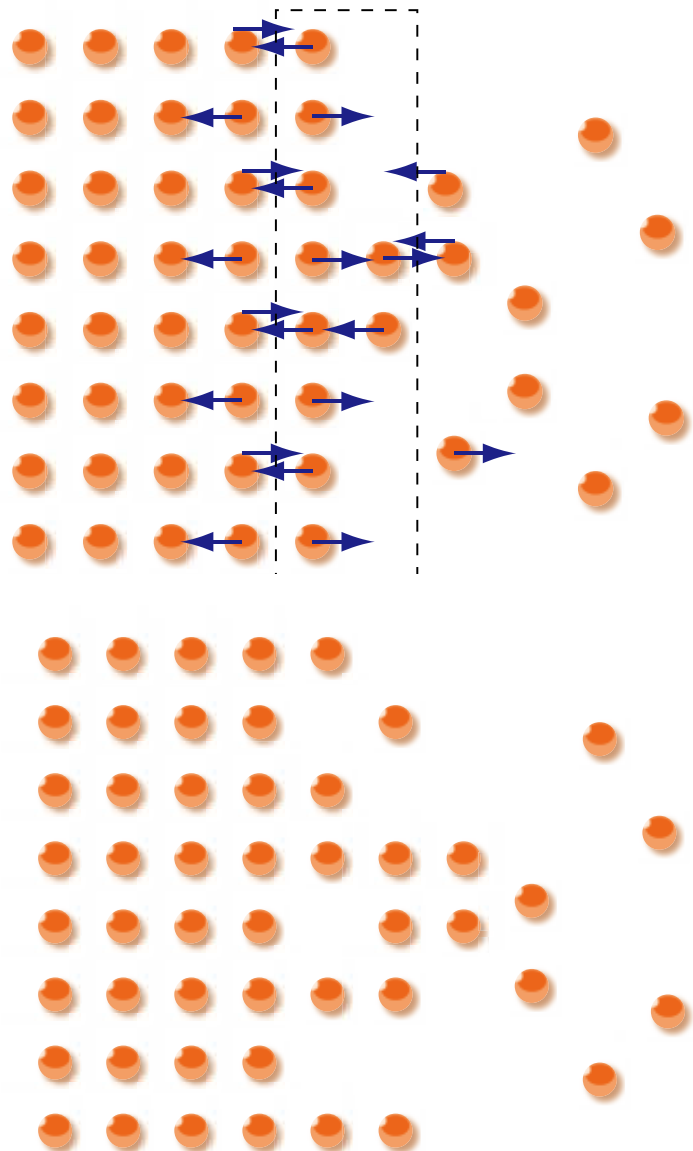
乱雑さが増す方向に進むという現象を端的に示しているのが**拡散**という現象です。拡散とは、濃度の差があると、全体としては濃度が高いところから低いところに向かって分子が移動していく現象です。たとえば、インクを水の中に垂らすと濃いところが薄れて、次第に均一な濃度になっていきます。これを分子の運動から考えてみましょう。

たとえば、水の中にナトリウムイオンがあり、濃度の高いところと低いところがあったとしましょう。図には簡単のためナトリウムイオンだけを書きます。ナトリウムイオンは熱によって乱雑に運動しています。本当はいろんな方向に進むのですが、特徴を見るために右か左かに半々の確率で移動するものとしてみましょう。点線の部分で、濃度が突然変わっています。それぞれの分子は半々の確率で右か左かに移動します。点線内部の左側の列は今8個ありますが、移動するため次の時間にはその列の左側から4つやってきて、右側から一つやってきます。

また、点線内部右側の列では、これも左側から4つやってきて右側から一つやってきます。したがって、境目は5つずつになるのがわかりますね。このように濃度の濃いところから多くの数がやってきて、薄いところからは少ない数がやってくるので全体として濃度の中間の値になろうとして均一になっていくのです。乱雑な熱の運動によって、**拡散が起こる**のです。

このような、拡散の現象も乱雑さ、エントロピーを増大する方向になるのです。

後の章で出てくるように、ナトリウムやカリウムの拡散の現象は、生命体の細胞の性質にとって重要な意味を持ちますので、記憶にとどめておいてください。



老化と酸化は関係あるの？

いつまでも若くありたいとはほとんどの人が思うことです。年を取ると、体力が衰え、しわが増えてきます。また、病気にかかった後に直りにくくなってきます。老化を防ぐにはなぜ老化が起こるのか考えなければなりません。現在では遺伝子のレベルで老化が起こることがわかっていますが、それだけが原因かどうかは確かではありません。多くの科学者は、酸化が老化に関係しているのではないかと疑っています。そのメカニズムはこうです。酸素などの酸化する物質が、体内を形成する高分子から電子を奪います。するとその電気的な力で、その高分子、たとえば細胞膜は他の分子と結合し、細胞の様子が変わってしまいます。すると、体内の免疫機能が働き、それを体内に本来あるものと思わなくて、その変化した細胞を殺してしまうというのです。この細胞がもし他にない細胞であれば、その細胞は他から生成されずに欠けたままになってしまいます。たとえば、脳の神経細胞などは大人になってからはめったに生成さえませんので、欠けたままになりやすくなります。

このような酸化を予防する物質が知られています。その一つがビタミンEです。研究では、ビタミンEが十分ないと、血液細胞の老化が早いことが報告されています。血液細胞は、酸素が近くにあるので最も酸化に起こされやすいのです。しかし、神経細胞や肌の老化に関して効果があるのかについては確実な証拠はありません。

また、ハーバード大学を卒業した男性8000人を調査した結果、チョコレートとキャンディーが好きな男性は、そうでない男性よりも約1年も長生きしているという結果がでました。チョコレートはフェノールを多く含むチョコレート
これが原因ではないかとも思われています。フェノール類は、ワインなどにも含まれています。しかし、この結果は統計的なばらつきのせいからかもしれません。また、単にチョコレートによってストレスが緩和され、それによって寿命が延びただけかもしれません。

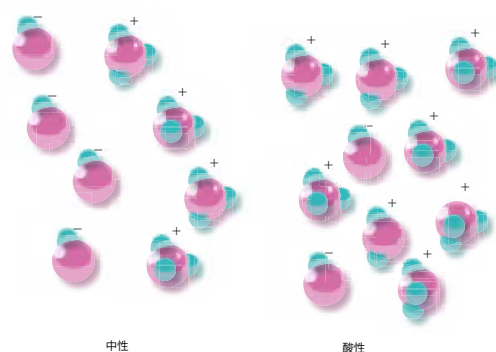
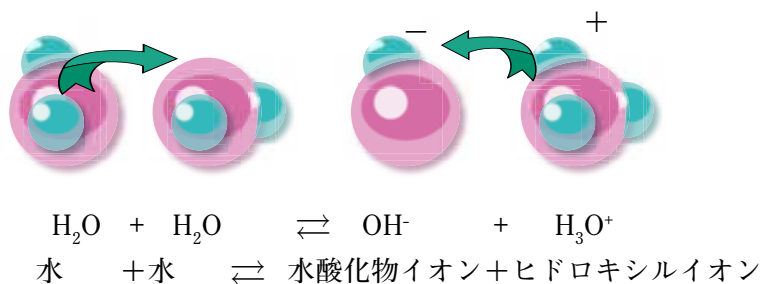
酸化は老化の原因因子の一つかどうかは科学的にはまだ確実な証拠がないのが現状です。



ワインもフェノールを多く含む

酸性とアルカリ性

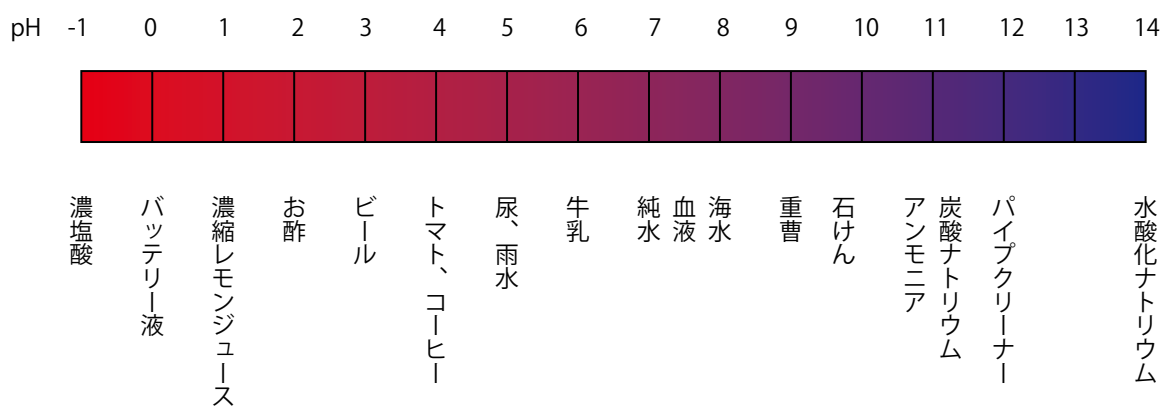
純粋の水でも、熱による衝突のため水素を明け渡してしまう水分子が希に存在します。図のように、水酸化物イオンとヒドロニウムイオンとになってしまうのです。こうした割合は非常に小さく、 10^7 個に 1 個の割合です。人間で言ったら、1000万人に一人というわけですから、かなり希です。しかし、身近な分子の数はアボガドロ定数という膨大な数ですので低い率と云っても無視できない数存在します。熱で運動していますので、イオンはできたままではなく、水にまたなったりします。つまり、絶えずイオンの生成を繰り返したり消滅したりしています。水同士が衝突して、水酸化物イオンとヒドロニウムイオンとができる率と、水酸化物イオンとヒドロニウムイオンとが衝突して水になる率が等しくなっています。



pH (Power of Hydrogen, 水素の指数) は、水素イオンの濃度を示す指数です。 H_3O^+ の濃度を $[\text{H}_3\text{O}^+]$ と括弧付きで表すと、pH は

$$\text{pH} = -\log[\text{H}_3\text{O}^+]$$

となります。



たとえば、中性の状態では、 $[\text{H}_3\text{O}^+] = 1 \times 10^{-7}$ ですので pH はこのべきの部分マイナスにしたもので、 $\text{pH} = 7$ となります。

食べ物を消化するために胃で分泌される消化液を胃液といいます。中には、塩酸が含まれていてこれを胃酸ともいいます。塩酸は水素と塩素の結合が弱いため、イオン化しやすく強酸です。弱酸は水素との結合が比較的強い分子です。

タンパク質を分解する酵素である、ペプチンは pH2 以下で活動が活発になります。そして、この塩酸により胃の内部の pH は 2 以下に保たれます。また、この強酸性のため、細菌やウイルスを殺菌したり、一部の有害物質を酸化し無害化したりします。

水酸化物イオン濃度とヒドロニウムイオン濃度の関係は？

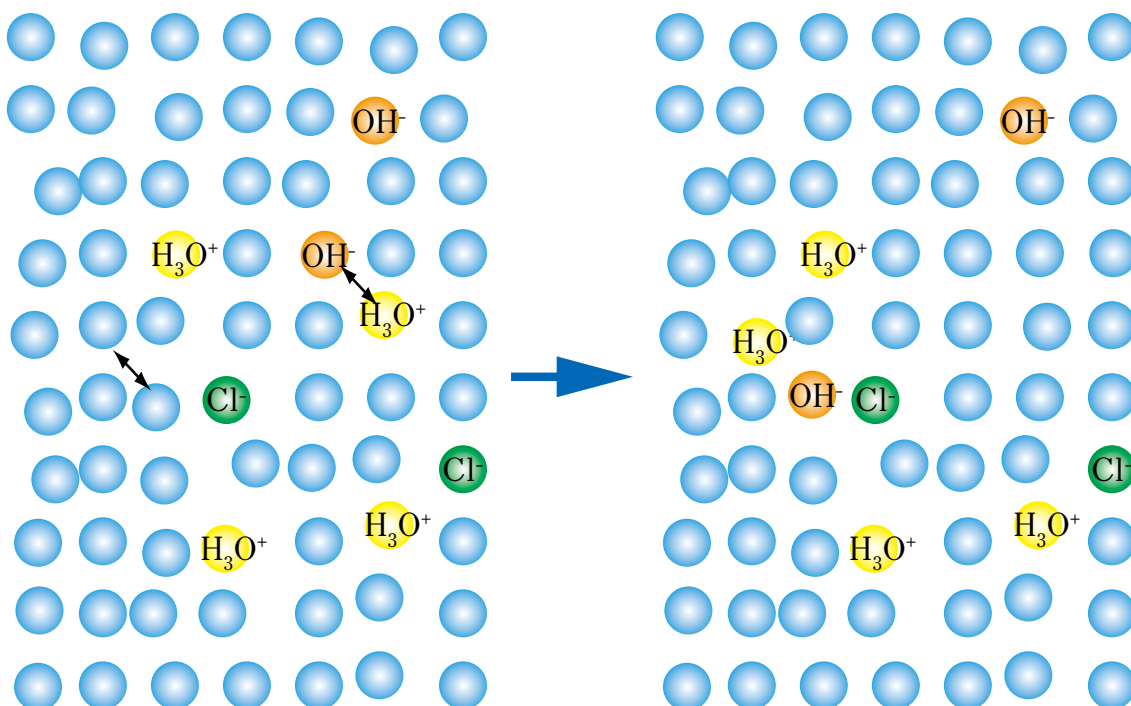
化学反応が進むと、それぞれのイオンなどの百々が変化していきますが、最終的に一定の値になります。このような状態では、化学反応とその逆の過程が同じ割合でおこります。このような平衡状態を**化学平衡**と言います。

この化学平衡の考え方で前節での水酸化物イオンとヒドロニウムイオンの濃度の関係を見てみましょう。水分子が熱により乱雑に運動していますが、中には同じ方向に押されるなどして非常に大きな運動エネルギーを得るものが現れます。これらの水が衝突して、水酸化物イオンとヒドロニウムイオンになることを見ました。しかし、この過程が起こり続けると、水酸化物イオンとヒドロニウムイオンの数が増え続けます。しかし、逆に水酸化物イオンとヒドロニウムイオンの衝突によって水分子になる変化と釣り合う地点で濃度は一定になるわけです。

水分子同士の衝突によってイオンができる率は、同じ温度では一定です。一方、水酸化物イオンとヒドロニウムイオンが衝突する率は、出会う確率に比例するはずですので、それぞれの濃度に比例するはずで、これが逆の変化が起こる率と釣り合います。これは水酸化物イオン濃度がどんな値であっても同じ値であることから、

$$[\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-] = \text{一定}$$

という関係があることがわかります。この値は25℃で 1×10^{-14} です。温度が高いと、平均運動エネルギーが高くなり、水分子同士の衝突によってイオンとなる割合が増加しますので、イオンの数が増加していきます。たとえば、30℃では、 $[\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-] = 1.47 \times 10^{-14}$ となります。



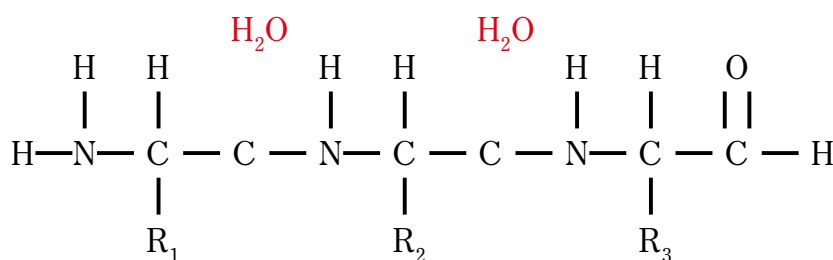
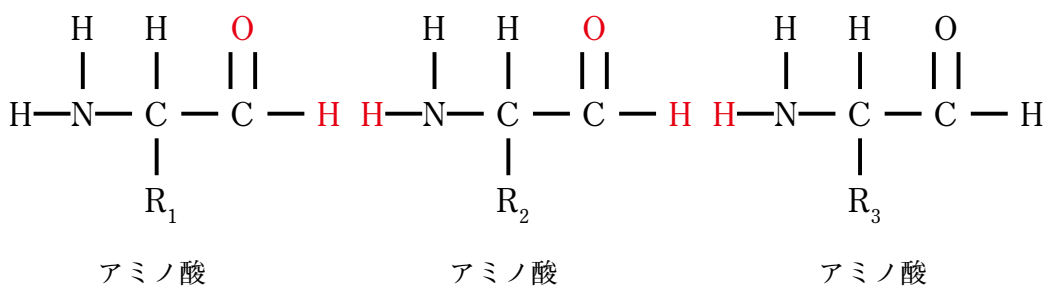
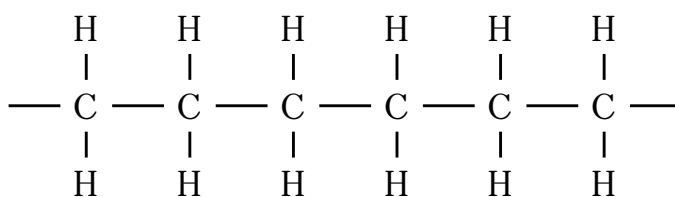
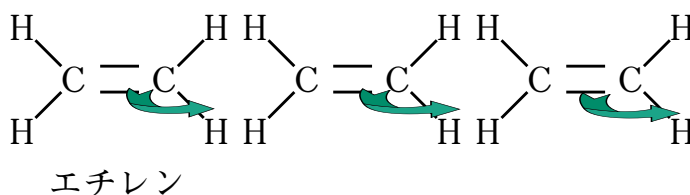
水分子同士の衝突によって、イオンが作られる率とイオン同士の衝突で水になる率が等しい状態で平衡となる。

重合体の反応とは？

生命体の構造の基本ブロックは原子の数が数十個と比較的少ない分子から成り立っています。これがどのようにして、数百万かの原子からなる非常に大きな数の分子をつくるのでしょうか？これは、**重合反応**という、重合体を作る反応に関係しているので

す。
ポリエチレンでは、エチレンの2重結合が外れて、隣の炭素と結びつくことによって重合します。このような重合を**付加重合**と言います。

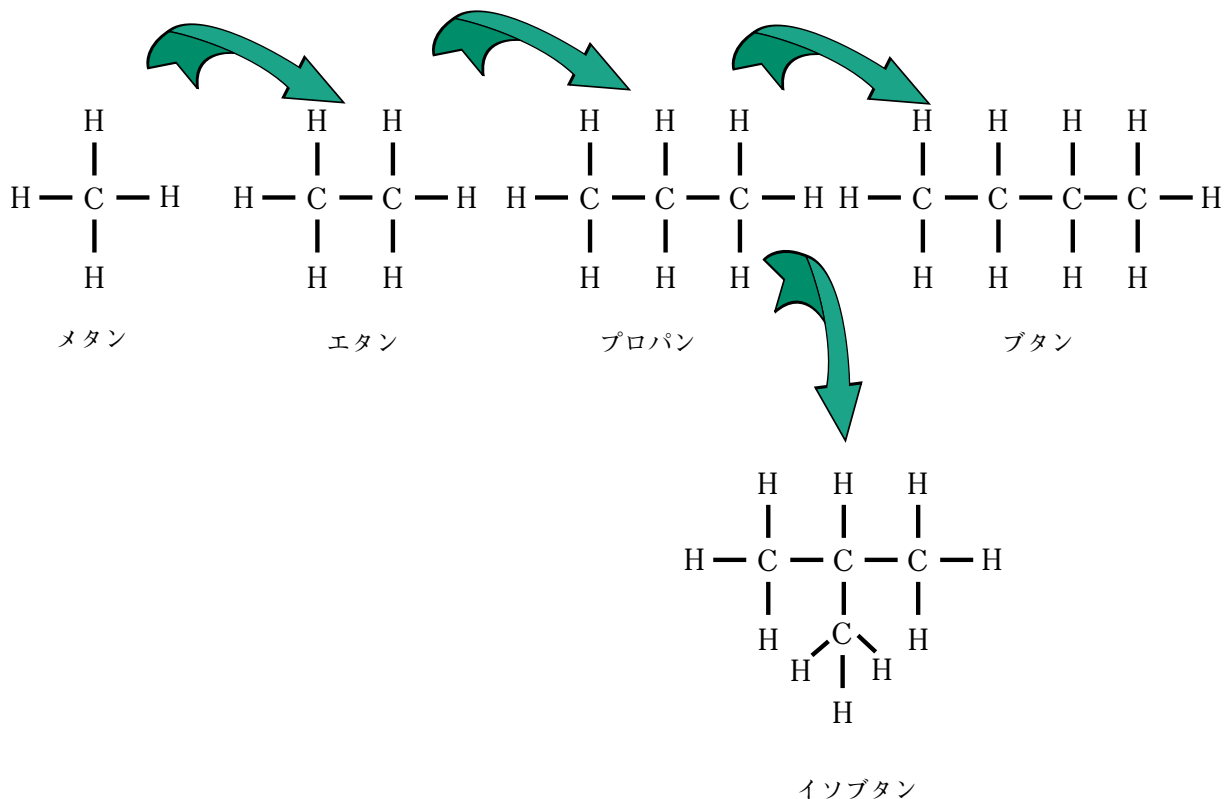
また、後に出てきますがアミノ酸は、ちょうど水になる部分をのぞいて重合して行きます。つまり、重合していくときに水が出てきます。このように、水を放出しながら重合するものを**縮重合**と言います。



炭化水素

炭素がどんなに多数の分子を作るか知るには、一番簡単な炭素と水素からなる分子を考えるといいでしょう。こうした炭素と水素からなる分子を**炭化水素**と言います。炭素1つに水素が4つ結合したものをメタンと言います。水素の一つを炭素に変えると、残りは水素でエタンとなります。また、どれかの水素を酸素に変えると3つの炭素は直線上に並べられますので、炭素が3つ並んだプロパンとなります。プロパンガスは燃料として用いられていますね。こんど3つある炭素の内、両脇の炭素に結合している水素を炭素に変えると、やはり直線上に炭素が並び、ブタンとなります。しかし、真ん中の炭素についている水素を炭素に変えると、炭素は直線上に並ばなくなります。これをイソブタンと言います。これは分子式で書くと、ブタンと変わりませんが分子の構造が変わります。このように、分子式が同じで配列だけ変わったものを**異性体 (アイソマー)**と言います。このように多数の炭素がつながっていくとアイソマーの数も増え、様々な分子が作られるのです。

また、水素に限らず炭素を中心に構成された化合物を**有機化合物**と言います。有機化合物は元々生命体の作り出す物質であることから命名されたものです。これについて詳生物を扱うときに詳しく説明しましょう。



塩素とダイオキシン

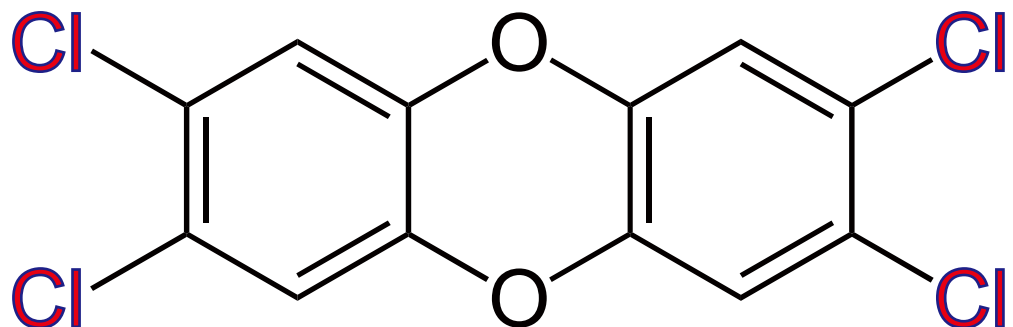
現在の私たちの健康に最も役に立っている化学物質は何でしょうか？それは塩素かもしれません。塩素のおかげで、私たちの飲む水は汚染から免れています。それだけではありません。医薬品の90パーセント以上が塩素原子を含んだ分子です。また、ほとんどの農作物の殺虫剤や殺菌剤なども塩素を含んだ化合物です。また、多くのプラスチックの材料としても使われており、塩素は様々なところで活躍しています。

塩素を水に溶け込ませると次亜塩素酸 HOCl ができます。これは非極性分子であり、非極性分子でできた微生物の細胞膜を通過でき、微生物を殺します。また、塩素は気体となって抜けやすいので、クロラミン NH_2Cl も消毒に用いられます。ただし、水道中にメタンなどの有機物が合った場合、メタンの3つの水素が塩素に変わった、トリハロメタンが作られる可能性があります。これは、発ガン性物質ですので上水場での取水に十分な注意が行われています。

塩素を作るのは非常に簡単です。食塩水は、ナトリウムイオンと、塩素イオンが含まれています。これに電圧をかけると、プラスの電極には塩素イオンが引きつけられて塩素が発生します。一方、マイナスの電極にはナトリウムイオンが付着しそうですが、ナトリウムは金属で重いので、水の中に含まれる水素イオンが付着して、水素が発生します。つまり



となるのです。このように、電気によりイオンを分離することを**電気分解**と言います。この反応では、水



素と水酸化ナトリウムという有用な二つの物質も生成できて便利です。

塩素はPVCという、パイプなどにもよく使われるプラスチックの原料となり有用な反面、有機物と塩素を含む物質とで不完全燃焼を起こすと、有害物質を精製する可能性が高くなります。この有害物質とは**ダイオキシン**です。これは図のように、有機部分に塩素がついて構成されています。

このダイオキシンは、人体への発ガン性が指摘されています。ダイオキシンは、非極性分子であり、脂肪などに蓄積され、人体に長く残るため、少量の摂取でも危険性が高まります。

有機化合物は完全に燃やせば二酸化炭素や水などになるわけですが、不完全燃焼では、一部が残ったままそれが塩素と結合してダイオキシンを生成する可能性があるわけです。家の庭で不用意にプラスチックルウを燃やすとダイオキシンが発生する可能性が高くなります。焼却炉ではダイオキシン対策のため十分な対策が必要となります。

DDTと殺虫剤の抱える問題とは

DDTはDichloro-diphenyl-trichloroethane（ジクロロジフェニルトリクロルエタン）の略称で、かつては最もよく使われた農業用殺虫剤でした。DDTそのものが最初に発見されたのは、1874年だったのですが、1939年に初めて殺虫剤としての効果があることが確認されました。この殺虫剤が現れる前、マラリアやチフスなど虫が関係する病気が、世界中多くの所で蔓延していました。しかし、この殺虫剤の登場でマラリアなどが激減したのです。DDTが殺虫剤として使えることを発見した、ポール・ミュラー博士は、人類の平和への貢献が認められ、1948年にノーベル賞を受賞しました。この殺虫剤は、非常に多くの虫に対して有効であり、しかも人間や動物に対しては比較的無害でしかも安価であり、理想的な殺虫剤と見なされていました。DDTは化学結合が強く、安定で壊れにくいので、環境で長く残存します。そのため、DDTの使用回数は少なくてもいいという利点がありました。実際、スリランカでは1948年から1962年までのDDTの定期散布により、それまで年間250万を数えたマラリア患者の数をなんと31人にまで激減させることに成功していたのです。

日本では、第2次世界大戦後、シラミ対策に用いられた後、農業用殺虫剤として使用されました。

しかし、1950年代前半からDDTに関わる問題が発覚してきました。虫たちは、この殺虫剤に対して耐性のある虫が生き残り、それが蔓延するようになってきたのです。しかも、環境において長期的に残存するDDTの性質が問題視されるようになってきました。人間や動物の代謝では、DDTは分解されません。非極性分子であるがために、水には溶けませんが、油には溶け、体内の脂肪細胞に蓄積されてしまうのです。米や小麦、野菜などの作物におけるDDTの残留は少ないのですが、鳥や魚への残存率は、植物のなんと1000万倍にも及ぶことが確認されたのです。DDTは、摂取した鳥が産む卵のカルシウム分を減少させます。このため、卵が予定より早くふ化してしまい、生存率を減少させました。このため、鳥の数が大幅に減少しました。また、DDTによる人間の発ガン性も指摘されました。

1972年には、アメリカなどで使用が禁止され、日本を始め各国も続々と禁止していったのです。また、新たに環境において早く分解される、殺虫剤が開発されていきました。

しかし、DDTが使用出来なくなったことにより、新たな問題が発生しました。それはマラリアが再び蔓延してきたのです。一説ではDDT不使用のため1千万人を越える人がマラリアにかかり、わずかな発ガン性と引き替えにするにはあまりにも大きいという意見もあります。2006年にWHOは、発展途上国において環境に影響のない室内においてのDDT使用を奨励することになりました。

DDTの問題は、世界的に見ると現在も矛盾に満ちた問題といえるのかもしれません。

スモッグと酸性雨

スモッグには2種類あります。一つは、光化学スモッグで、窒素酸化物やオゾンなどの汚染物質を作り出すのに光が必要になります。もう一つは、硫黄分を含む石炭を燃やすことにより発生するものです。

光化学スモッグは、主に車や向上の排気ガスに起因します。1970年代に日本に多く発生しましたが、各種の排気ガス規制により減少していました。しかし、最近中国からの排気ガスの流入により九州地方で発生したり、ヒートアイランド現象などにより発生が多くなったりしてきています。

車のエンジンの燃焼過程では、窒素が酸素と結合し、一酸化窒素となります。



空気中では一酸化窒素 NO が酸素と反応し、赤茶けた色の気体である、二酸化窒素 NO₂ が作り出されます。



太陽光のエネルギーにより、二酸化窒素は一酸化窒素に分解されます。



酸素原子は不安定で反応性が高く、空気中の酸素と結合してオゾン O₃ を作り出します。



上空の大気ではオゾンは、紫外線を吸収して地上に有害な紫外線が降り注ぐのを防ぐ意味で非常に有益です。しかし、地上では目がちかちかしたり、呼吸器官に影響が出たりします。また、オゾンによる酸化反応により植物の葉が黄色くなるなどの影響が出ます。

工業によって起こるスモッグは、硫黄分を多く含む石炭を燃焼させているところで多発します。生物がなぜ硫黄を含むのかは後の章で見ますのでここではこれを事実として受け止めてください。昔の植物が炭化して石炭となったので、石炭は硫黄を含むのです。

硫黄 S が燃焼で、二酸化硫黄になります。



二酸化硫黄は植物に害があり、成長を阻害します。また、人体にも影響し、咳や気管支炎などを引き起こします。1961年より発生した四日市ぜんそくなどがこの二酸化硫黄による健康被害の代表例です。日本では、石炭の利用が減少していたり、硫黄を取り除く装置の開発により、その被害は減少していますが、中国などでは現在も大きな被害が出ています。

二酸化硫黄は空気中の酸素と反応して、三酸化硫黄となります。



そして、これが水蒸気などと反応して硫酸が作られるのです。

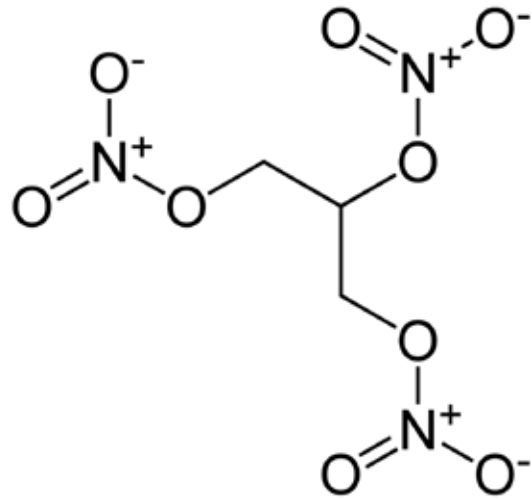


硫酸を含む雨は、水を酸性にし、動植物の生存に影響を及ぼすのです。これが**酸性雨**の主な原因です。



爆弾とノーベル

化学結合には非常の多くのエネルギーが蓄えられています。このことを示す一番良い例が爆弾でしょう。爆弾には次の性質が必要です。まず、発熱反応であることですが、生成物は気体であることが望ましく、これにより爆風を作ることができます。また、その反応は破壊力を増すために非常に素早く起こることが必要です。このためには、外部から酸素を取り込む燃焼ではなく、化合物そのものに燃焼するための酸素などが含まれていることが望ましいわけです。また、取り扱い上、その物質は安定であり、落とした程度では爆発しないことが必要です。化学結合が強いと反応は進みにくいので、化学結合は非常に弱く、他の強固な結合に移るときにエネルギーを放出させることも重要です。最も強い結合は、窒素、酸素、炭素の間で起こります。このため、窒素や酸素、水などを生成物とする物質が望ましいものとなります。



ニトログリセリンの構造

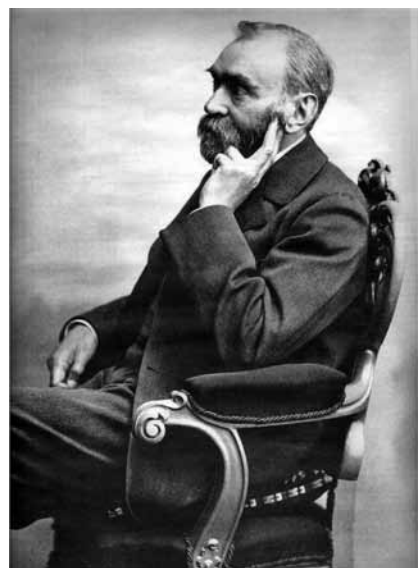
ニトログリセリンは $C_3H_5N_3O_9$ という化学式で表されます。常温で液体でありこれは、そのまま、



と、自分自身だけで窒素、二酸化炭素、水と酸素と安定な結合をしてそのときに大きなエネルギーを放出するのです。**ニトログリセリンは外部からの酸素が要らないので爆発的に反応が進むわけ**です。まさに、爆発物としてうってつけというわけです。

しかし、残念ながらニトログリセリンは不安定です。化学結合が弱いのがあだとなり、すこし振っただけで爆発してしまいます。そのため、必要な場面以前で爆発してしまう確率が高く、ニトログリセリンは爆弾としては使い物になりませんでした。

ノーベルは偶然、ニトログリセリンをセルロースにしみこめると安定になることを発見しました。これがダイナマイトです。工事現場や戦争に使う爆弾としてダイナマイトは大いに売れました。ノーベルはこれで巨万の富を築きます。彼は同時に複雑な人間でした。彼は一度も結婚せず、病気になったこともしばしばで、鬱病にもなりました。彼は戦争で儲けましたが、平和運動に情熱を燃やします。彼は、自分の財産を元に、人類の利益に貢献した人に対して送る賞を設けたのです。ノーベル賞は科学者が最も欲しがる賞であることは間違いありません。



キーワード

ダイヤモンド、黒鉛（グラファイト）、重合体（ポリマー）、モノマー、化学反応、エンタルピー、発熱反応、吸熱反応、活性化エネルギー、触媒、酸化、炭化水素、還元、酸化還元反応、酸、ヒドロニウムイオン、塩基、水酸化物イオン、塩（えん）、中和反応、拡散、pH（ピーエイチ）、重合、付加重合、縮重重合、炭水化物、異性体（アイソマー）、有機化合物、電気分解、酸性雨、ニトログリセリン、ノーベル