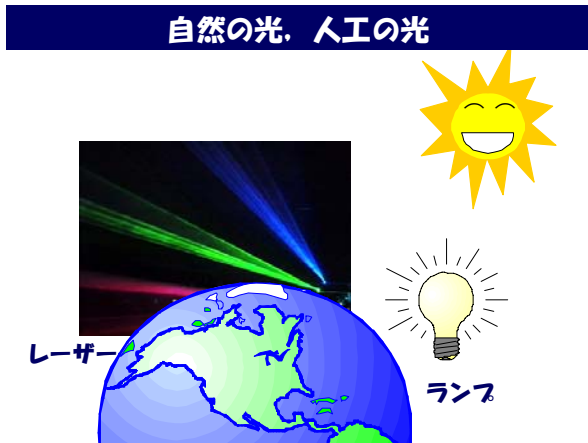


光と化学

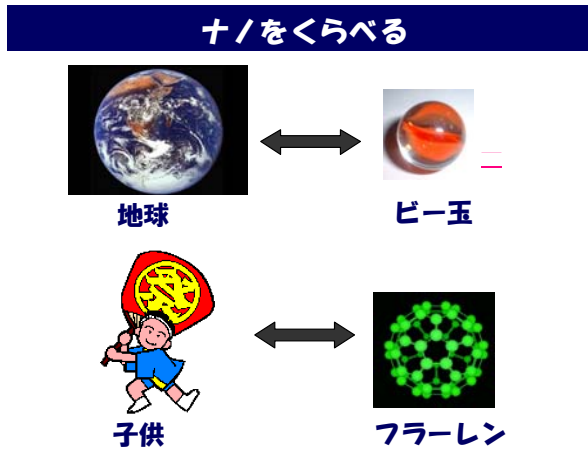
【プロローグ】

“光”は私達にとってはなくてはならないものです。地球に降り注ぐ太陽光は生命を育み、エネルギーや豊かな自然を与えてくれます。一方、私達人類は、火を扱い、電球や蛍光灯、そして夢の光と言われるレーザー光など、すばらしい“人工の光”も創り出してきました。文明は光と共に発展してきたのです。そして今、部屋の明かりはもちろんのこと、マルチメディアや医療など、あらゆるところで“光”が活躍しています。21世紀はまさしく“光の世紀”といえるでしょう。時間や長さの基準にも光が使われているのです。大切なことは、このような光技術を支えているのは化学物質なのです。光と化学の関係がいかに密接かつ大切であるか、これから説明しましょう。



【ナノの世界と私たちの世界】

このことを理解するには、まず、ナノ(10億分の1)の世界について考える必要があります。私たちの日常の世界はMKS(m, kg, s)の世界ですが、ナノの世界とはどのようなものなのでしょう？一例を以下に示します。ナノ(単位はnであらわします)にすると、32年が1秒になります。地球がビー玉になり、スイカが分子になります。地上にいると、ビー玉は見えますが、地球は大きすぎて見えません。逆に、スイカは見えますが、分子はとてつもなく小さく、肉眼では見えません。1mの人間が1sの間に1m手を動かすことは、ゆっくりした現象です。それは、分子が1nsの間に電子を1nm動かすことに対応しており、ナノの世界ではゆっくりした現象なのです。ところで、緑色の光の波長はおよそ520nm。光もナノの世界の一員なのです。“はじめに光ありき”というゲーテの有名なことばがあります。その本質は、実はナノの世界のことなのです。“塵”という用語があります。これは仏教の世界ではナノの意味です。このように、ナノの世界のことを昔の人は考えていたのです。



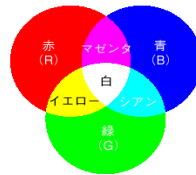
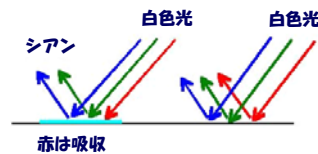
【光と化学】

さて、木の葉が緑に見えるのは、木の葉が赤い光(波長で600-700nm)を吸収するので、赤の補色の緑色に見えるのです。視覚も光と分子の関係が基本です。すなわち、ロドプシンという分子が光を吸収すると、ロドプシンの中の電子が動き、分子の形が変わります(光異性化といいます。後述)。つまり、光という情報を分子認識し記憶するのです。このように、ナノの世界で起こっている現象が増幅されて、

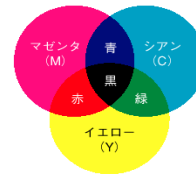
MKSの世界を動かしているのです。ところが最近、ナノの世界を直接観察したり操作したりする技術が飛躍的に進歩しました。分子の形を直接観察したり、タンパク分子を引っ張ったりすることができるようになってきたのです。ナノテクノロジーとはそのような技術なのです。つまりナノテクノロジーを先導するのは、まぎれもなく物理や化学の技術なのです。最近、日本の科学者が3年連続で

ノーベル化学賞を受賞しています。日本の化学研究のレベルの高さが実証されたのです。化学は、ビーカーや三角フラスコを使うだけのものではありません。上にのべたような最新鋭の機器を活用して、分子のかたちやはたらきを解明したり、分子を組み合わせたり並べたりする技術を開発し、人類の役に立つ物質を造り上げている夢のある分野なのです。

三原色



加法混色
黒に光を加えてゆく方法
(0%で黒、100%で白)



減法混色
黒から色の割合を引いてゆく方法
(0%で白、100%で黒)

パソコン、TVの画面の色

カラー印刷、絵の具の着色

【光の性質】

光は“波”としての性質と、“粒子”としての性質をもっています。赤い光(の周波数)は赤という情報を伝えます。一方、太陽電池は光のエネルギーを電気のエネルギーに変えているのです。つまり波としての性質は情報として、粒子としての性質はエネルギーとして使えます。

光通信は光を情報として利用するものです。“のろし”も光通信のひとつでしょう。今では光の波に情報をのせるような光通信も考えられています。現在のマルチメディアを支えているのは光なのです。すなわち、エレクトロニクスからフォトニクスの時代が到来しているのです。

一方、光が水の中に入るとき、屈折します。光はまっすぐ進みたいのに、水で方向を曲げられているのです。これは光と水の力関係のようなもので、水の方が力が強いので、光が曲げられてしまうのです。それでは、レーザーのような非常に強い光を非常に小さな水滴に当てたらどうなるでしょう。予想されるとおり、光によって水滴を動かすことができるのです。つまり、光が小さな粒子を動かしたり、捕まえたりできるピンセットとしての役目を果たすのです。これは光の輻射圧という一種の力によるもので、実は、夏目漱石さんの「三四郎」という小説の中にも紹介されているものです。光の輻射圧は、ニコルスという人が実証しました(1901年)。

しかし、それが光ピンセットとして使える(アシュキン、1970年)ということが分かるまでには、70年近くかかっています。光線にも力があるのです。

赤外線というと、漫画やアニメでよくでてくる非常に強い光線銃のイメージがあります。ところが、赤外線よりも可視光線の方がずっと強いエネルギーを持っているのです。光のエネルギーは波長に反比例します。ですから、赤外線(波長は数万nm)と可視光線(数百nm)を比較すると、可視光線の方が100倍も強いエネルギーをもっていることになるのです。私たち生命

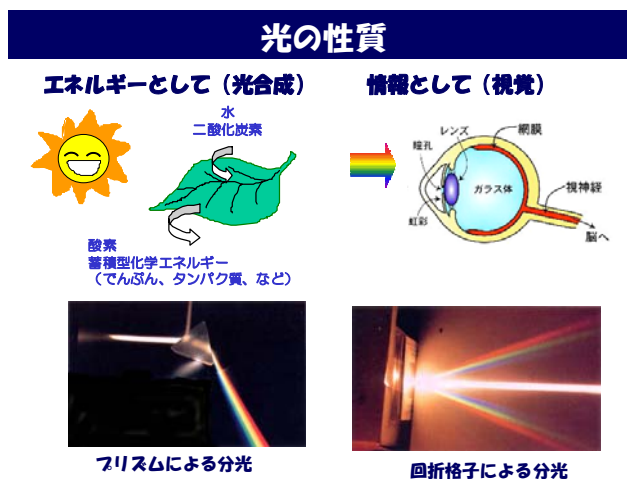
体は、こんなに強いエネルギーを受け続けているのです。だけど、大丈夫なのはどうしてでしょう。それは、分子の中の電子が光のエネルギーを吸収して、分子の中で、あるいは分子から分子へと動くためのエネルギーに変わってしまうからです。つまり電子が光というエネルギーを受け取り、光は電子に吸収されて消えてしまうのです。これにかかる時間は10-15秒というとても短い

時間でおこります。海水浴で日焼けをするのも同じ理屈です。日焼けは、皮膚の細胞が紫外光線を吸収して変化し、これ以上紫外線があたるのを防ごうとする防御策なのです。一方、赤外線があたるとどんなことが起こるでしょう。赤外線コタツを思い浮かべて下さい。この場合には、分子を構成する原子と原子の間の距離や角度が変わってしまう(分子自身の振動)が起こり、熱が発生して熱く感じられるようになります。しかし、紫外線のように、電子が分子の中を大きく動くわけではなく、光の電場で原子と電子が揺さぶられると考えた方がイメージしやすいかもしれません。

光を、非常に軽いヒモのようなものと仮定して見ましょう。ヒモが電子の粒にあたると、電子の周りにまとわりついたような状態ができます(光の吸収)。この状態の電子が動く速度が変わったり、動く方向が変わったりすると、ひもが動きの変化についてゆけず、電子から離れていきます(光の放出)。電子は重さが変わるのではなく、電子がエネルギーを得るのです。得たエネルギーは、やがて同じ大きさのエネルギーを光や熱のエネルギーをして放出し、最初の状態に戻ります。

【分子は機械？】

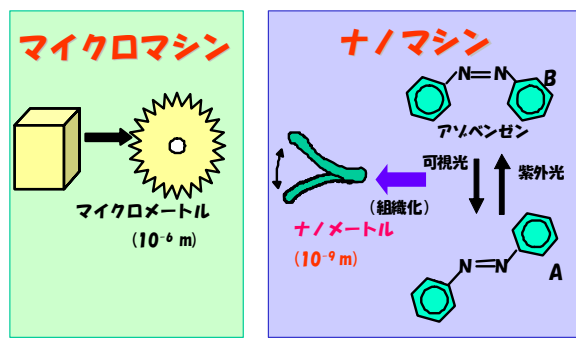
さて、赤、青、黄色といった目にみえる光(可視光)は数万度の温度に匹敵するエネルギーを持っているのです。このような光をエネルギー源として使うと、100℃ではとても起こらないような化学反応がいつも簡単に起こってしまいます。はじめの方に述べた視覚の現象もそうですが、ここではもっと簡単な分子で説明します。分子の中の電子が動く(電子の遷移)例を紹



紹介します。下に示しているアゾベンゼンという2個のベンゼン環と2個の窒素(N)からできている分子に紫外光(～360nm)をあてるとA(トランス体)からB(シス体)へ変わります。ところが、可視光(400nm以上)をあてるとBからAへ逆戻りします。このような現象を光異性化といいます。このように、あてる光の色を変えるだけで分子が繰り返し動く(形を変える)のです。タンパク分子などの大きな分子を除き、多くの分子の大きさは1nm以下です。“マイクロマシン”という言葉は聞かれたことがある

かと思いますが、分子はそれより1000分の1以下という究極のマイクロマシンとも言えます。マイクロマシンは加工して作ります(トップダウン方式)が、原子を組み合わせて分子を作り、さらに分子を組み合わせて大きな組織体(ナノマシンとも言えます)を作りあげてゆく(ボトムアップ方式)ことこそ、化学の醍醐味でもあります。また、このように

分子は機械？



とてつもなく小さなマシンを動かすためのエネルギー源こそ、光が最適なのです。

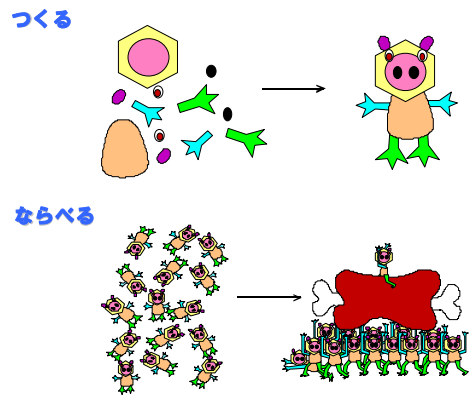
【分子をつくる, ならべる】

ようやく私たちの研究紹介にたどり着きました。私達の研究室では、太陽電池や光検出素子のように、光エネルギーを電気(化学)エネルギーに変える分子やそのシステムを開発しています。しかし、現在の技術をもってしても、一つ一つの分子を実際の機械やパーツとして利用することは、まだ不可能です。それに必要なパッケージや、外部からエネルギーを与えたり外部にエネルギーを取り出すための技術も充分には出来上がっていないからです。しかし、技術は急速に進歩しています。レイ・カーツワイルも予測しているように、いずれはナノロボットもできるでしょう。

話を戻しましょう。とにかく、分子でエネルギー変換を行う場合、①高い能力を持つ分子を作ること、②目的に応じた機能が発現できるように分子を並べること。この2つが基本となります。下の図を見てください。いろんな部品をうまく組み合わせて分子(ナノマシン)を創りますが、それがバラバラでは役に立ちません。うまくならんでこそ分子の能力が(目に見える形で)発揮されるのです。

それではピンセットでもつかめなような小さな分子をどうすれば並べることができるのでし

分子をつくる, ならべる



ようか？それにはいろいろな方法があるのです。

例えば、水の上に油を落とすと油は水面上でサーっと広がります。油の分子が水面上に並びます(左図)。これをガラス板の上ですくいとります。この操作を繰り返せば油の分子を積み重ねることができます(Langmuir-Blodgett 法)。あるいは金とイオウ(S)がくっつきやすいこと(Self-Assembling)を利用する方法も大変便利です。金は電気を通しますから電極にもなります。つまり分子が同じ方向で、しかも一層の厚みで表面に並んだ電極を簡単に作ることができます(分子修飾電極と呼びましょう)。あるいは、プラスとマイナスの静電相互作用を利用する交互吸着法もあります(略)。

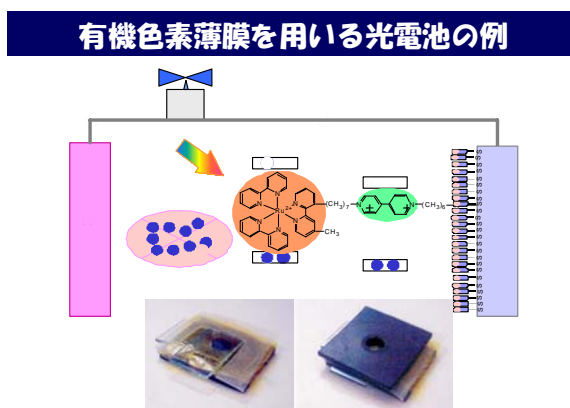
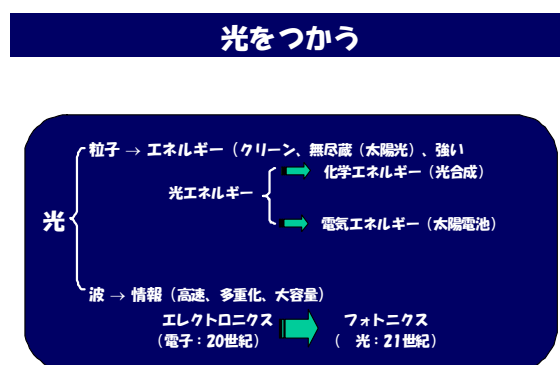
【光をつかう】

このように分子を同じ方向に並べることによって、光エネルギーを電気エネルギーとして取り出すことができるようになります。分子が並んだ電極に可視光をあてると、先ず分子が光を吸収し、分子から電子が飛び出し、電極へ移ります。電極にリード線をはやして回路をつくと、電気が流れます。つまり、光エネルギー→電気エネルギーへの変換が起こることになります。あちらこちらで使われている太陽電池にも似かよった原理で作動します。つまり、有機分子で太陽電池

を作ることができるのです。ポイントは、光で電子を動かすこと、つまり光エネルギーが電子に移り、電子がエネルギーを獲得するということなのです。私たちは、フラレン、ポリチオフェン、その他たくさんの有機分子を組み合わせ、安価で手軽にできる未来の太陽電池を創っています。

【金ナノ粒子の不思議】

直径が数ナノメートル～数十ナノメートルの金微粒子(金ナノ粒子と呼びます。また溶媒に分散させたものを金コロイド溶液といいます)は、鮮やかでとても深みのある赤ワインのような色を示します。そのため、金ナノ粒子は、古くからステンドグラスやガラス容器などの工芸品にも用いられていました。その金ナノ粒子が、今、再び注目を集めるようになりました。金ナノ粒子というと普通は丸い形のものをイメージしますが、近年では棒状(金ナノロッドと呼びます)や三角形のものなどいろいろな形をしたナノ粒子が合成できるようになりました。私たちは、今、金ナノロッドに注目しています。



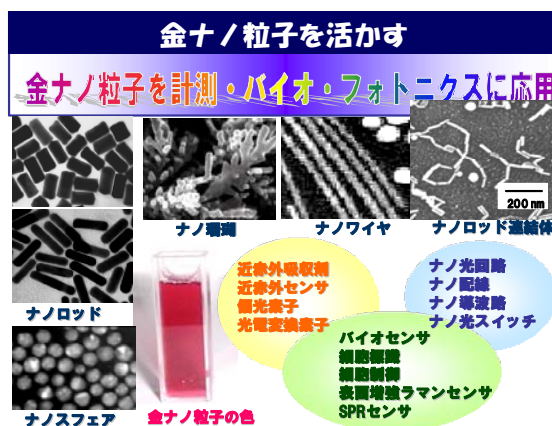
<http://photochem.cstm.kyushu-u.ac.jp/>

直径 15 nm の金ナノ粒子には10万個の金原子が含まれています。金原子の集まり方を
 変えると形を変えることはできるでしょう。しかし実際には、色まで変わるのです。金原子
 の数は同じであっても、集まり方が変わるだけでどうして色の変化までおこるので
 しょう？このように、金ナノ粒子の不思議なところは、形、サイズ、集合状態、周囲の環
 境(溶媒)によってあざやかな色の変化を示すところ。これは表面プラズモン共
 鳴という特有の現象によるものです。とにかく、このようなあざやかな色調の変化を
 利用して、近年では、バイオセンサや光スイッチなどの次世代のセンシング材料やフォトニク
 ス材料として注目され、世界中で研究が行われるようになりました。ナノテクノロジーの分野で
 大変注目されている物質の一つなのです。今、再び金ナノ粒子が熱い注目を集めているので
 す。金以外にも、銀や銅も似たような性質を示します。



【金ナノ粒子を活かす】

私達は、金ナノ粒子を有機分子でおおい、水にしか溶けない金ナノ粒子や水には溶けない
 金ナノ粒子を作っています。また金ナノロッドを簡単に大量に作る方法も開発したばかりです。
 金ナノ粒子に光をあてると、有機分子ではおこらないような大変おもしろい現象がおこります。
 そのいくつかを紹介しましょう。金ナノ粒子に強いレーザーをあてると、金ナノ粒子が100万
 個くらい集まった大きな球状の金粒子ができることを発見しました。集まって丸くなるとい
 うことは、金ナノ粒子が溶けた状態になるの
 です。金の融点は1100度くらいです。レー
 ザー光を吸収すると、これほど高い温度に
 なっているのでしょうか？そうではなさそうで
 す。ナノサイズになると融点が大きく下が
 ります。とにかく、ナノの世界では、常識では
 想像できないような不思議な現象がおこっ
 てきます。ナノの不思議。これがまた化学の面
 白さでもあります。



金ナノロッドを含んだフィルムを作り、ある特定の波長の偏光レーザーを照射すると、特定
 の方向を向いた金ナノロッドを選択的に丸くすることができます。これを利用して、光の波長と
 偏光とで書き込みができる画期的な光書き込み技術を開発しました。そのほか、レーザーで
 金ナノ粒子を思い通りにパターン固定する技術やそれを活用した新しいメッキ技術などを

続々と開発し、特許として出願中です。また、地球を覆う空気のように、金ナノ粒子の表面が光で覆われるような現象がおこることも金ナノ粒子ならではの特徴です。この特徴を活用して、金ナノ粒子の表面にくっついた分子をきわめて高感度に検出することができます。詳細は省略しますが、今、最も注目されているバイオセンシング技術の一つなのです。

有機分子と金ナノ粒子をうまく組み合わせるといろいろな応用が可能であることが分かってきました。もちろん光の波長をかえたり、光→電気エネルギー変換にも活用しています。くわしくはまだ秘密ですが、“コロンブスの卵”を目指し、ワクワクしながら研究をすすめています。

【エピソード】

21世紀は“光の世紀”とも呼ばれています。“電子の時代”から“光の時代”へと変わりつつあります。私たちは、光を創り、使うことを一生懸命やってきました。

話は変わって、6億年前の地球は氷の世界だったそうです。温室効果の大きいメタンガスを作り出すメタン細菌と、メタンと反応する酸素を作り出す光合成細菌が争って、光合成細菌が勝った。そのためメタンガスが急激に減って、氷の世界になったそうです。太陽の光は、地球、すなわち私たち生命の運命をも左右しているのです。

水や空気のように、光は私達にとってはとても身近な存在です。光のありがたさをあらためて認識しましょう。そして私達の幸せのために、未来のために、もっともっと光をうまく使っていくことが大切です。エネルギー問題や環境問題に立ち向かうために最も強い力こそ、“光”なのです。

