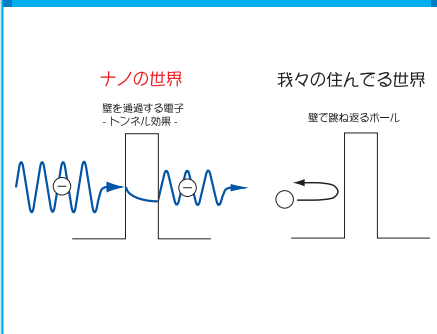


1個の電子を操作するナノデバイス

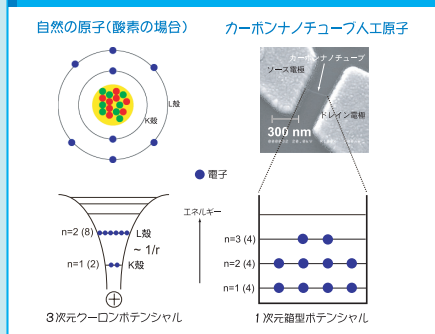
量子ドット、人工原子そして単電子トランジスタ

1 ナノの世界を支配する量子物理学



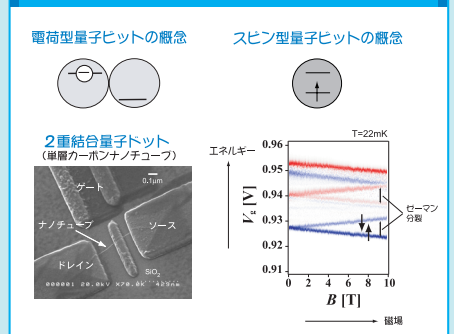
非常に小さなナノの世界の主役である電子は、量子物理学という我々の常識では考えられない法則に支配されています。それは、電子は粒子であるとともに波であるという、いわゆる2重性とよばれる性質です。これによって、電子は壁を透過して通り抜けることができます。これをトンネル効果といいます。

2 自然の原子と量子ドット、人工原子



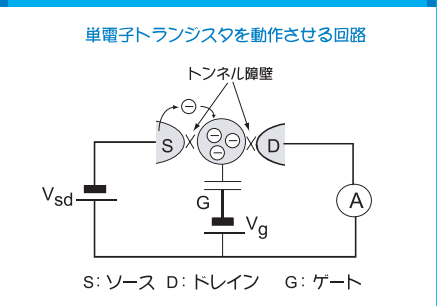
量子ドットとは、1~100ナノメートル(1ナノメートルは、100万分の1ミリメートル)程度の領域に電子を閉じこめた構造です。電子がある領域に閉じこめている状況は、原子に似ており、量子ドットは人工原子とも呼ばれます。人工原子では、大きさや電子の数を好きなように設計することができるのです。

3 量子コンピュータへ向けて



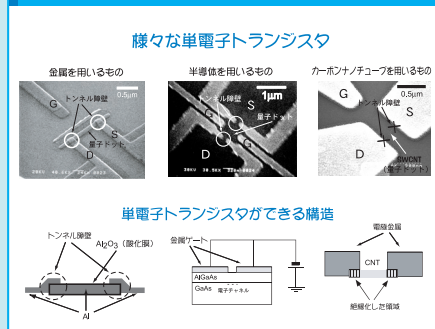
量子ドットは量子コンピュータの基本ユニットである量子ビットにも使えらとされています。量子ドットを使った量子ビットには、電荷型(左)とスピン型(右)が提案されていますが、ここでもカーボンナノチューブは有望な材料であると考えられています。

4 電子を1個単位で制御する単電子トランジスタ



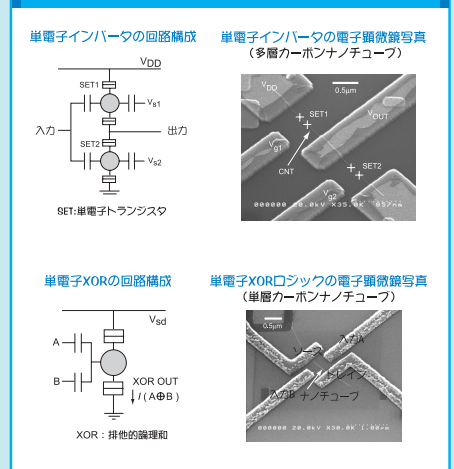
量子ドット(人工原子)に電流を流すために、トンネル障壁(図1参照)を介して、ソースとドレインの電極をつけ、量子ドットの電位を変えられるようにゲート電極をつけたデバイスを単電子トランジスタといいます。単電子トランジスタでは、量子ドットの中の電子の数を1個単位で変えることができます。

5 単電子トランジスタの実際



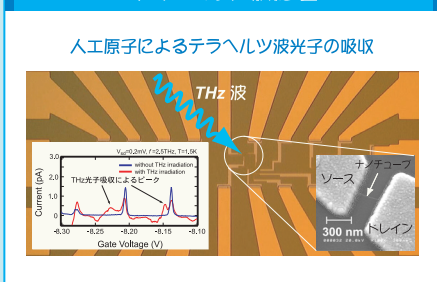
単電子トランジスタは、金属や半導体、そして最近ではカーボンナノチューブなどで作られるようになりました。単電子トランジスタは真ん中の量子ドットが小さければ小さいほど性能がいいので、1ナノメートルほどの直径しかないカーボンナノチューブはうってつけなのです。

6 単電子デバイス(単電子トランジスタの発展形)



単電子トランジスタを組み合わせた、変形することによって単電子ロジックを実現することができます。単電子ロジックでは電子を1個単位で制御するので、今のコンピュータで大きな問題となっている消費電力を大変小さく押さえることができるのではないかと考えられています。

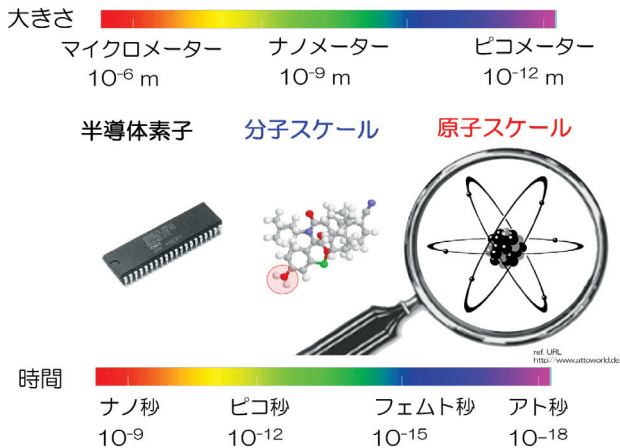
7 単電子トランジスタのテラヘルツ波応答



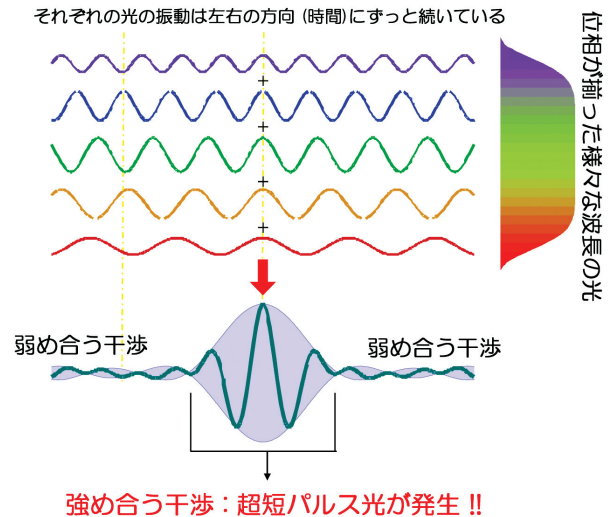
テラヘルツ波は電波と光の間の周波数(数百ギガヘルツから数十テラヘルツ)を持つ電磁波です。電波の技術や光の技術をそのまま使うことができないので、生体、環境計測や天文学の観点から重要であることがわかっていながら、発振器や受信機の技術が十分発展していません。私たちは、カーボンナノチューブの単電子トランジスタでテラヘルツ波の光子(光の粒子)をとらえることに初めて成功し、新しいタイプの受信機に応用できると期待しています。

1000兆分の1秒の動きをとらえる 究極のフラッシュ・アト秒レーザー

マイクロの世界で運動する物質の大きさと速さ

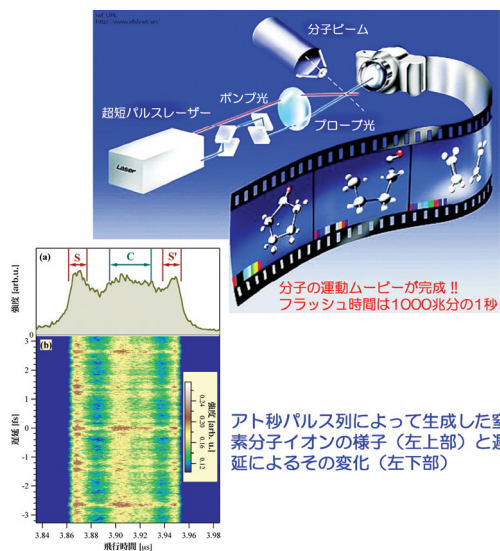


レーザー光を合成して超短パルス光をつくる

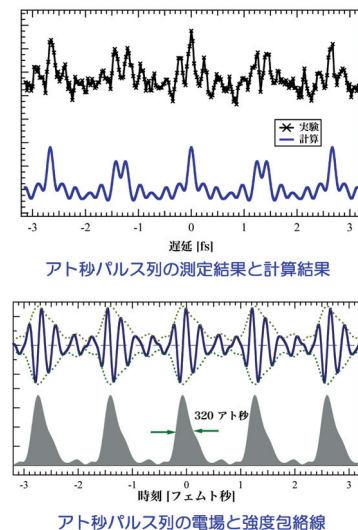


基礎科学の分野では超高速現象を「止めて」観測する研究が進んでいます。現在ではパルスレーザー光によって10兆分の1秒から100兆分の1秒程度(フェムト秒)の時間であれば、現象を「止めて」見る事が可能になっています。近年これよりもさらに短い時間幅のレーザー光、すなわち、アト秒パルスを得ようという試みが行われるようになってきました。この研究分野は、世界各国で盛んに研究されていますが、アト秒パルスの中身、すなわち光パルスを構成している「波」の姿までとらえる事はできませんでした。

超短パルス光を使うと分子運動を撮影することもできる



X線領域の光を合成して1000兆分の1秒以下のフラッシュ(アト秒レーザー)をつくりだす



私たちの研究グループでは、極端紫外レーザー光によって引き起こされる非線形光学現象を用いて、1000兆分の0.32秒(320アト秒)という世界最短の物理現象の測定に成功しました。さらにアト秒パルスの中に、規則正しい波の構造がある事を世界で初めて直接観測する事にも成功しました。この光を使って分子の超高速反応を制御をしたり、電子の運動を直接計測する道がひらけてきました。

鋭い針で原子を見る —走査トンネル顕微鏡—

原子の大きさはおよそ $0.1 \text{ nm} = 100 \text{ 億分の} 1 \text{ メートル}$
 $= 1/10,000,000,000 \text{ m}$

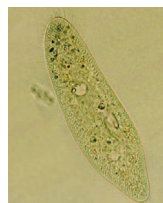
$1 \text{ mm (ミリ)} = 1/1000 \text{ m}$, $1 \mu\text{m (ミクロン)} = 1/1000 \text{ mm}$
 $1 \text{ nm (ナノ)} = 1/1000 \mu\text{m}$



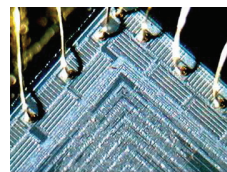
鉛筆の芯の太さ
 $\sim 1 \text{ mm}$



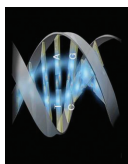
紙の毛の太さ
 $\sim 100 \mu\text{m}$



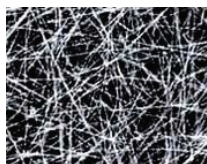
プランクトンの体長
 $\sim 10 \mu\text{m}$



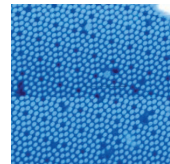
集積回路の配線の幅
 $\sim 1 \mu\text{m}$



DNAのサイズ
 $\sim 100 \text{ nm}$

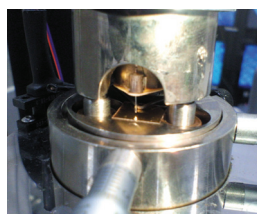


ナノチューブの太さ
 $\sim 10 \text{ nm}$

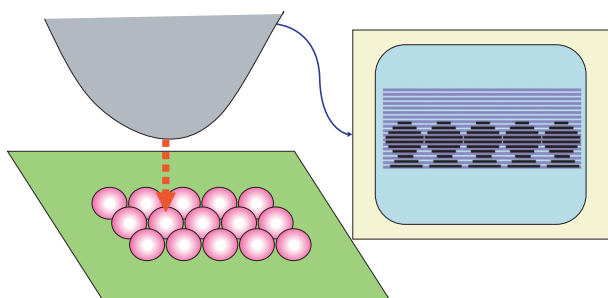


原子・分子の大きさ
 $\sim 1 \text{ nm} \sim 0.1 \text{ nm}$

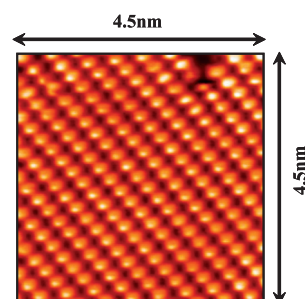
光学顕微鏡で遠くから眺めても原子は小さすぎて見えない
 指先で小さなデコボコを感じるように鋭い針で原子を感じることができる



鋭い針でサンプルをスキャンして、流れる電流で画像を見る



金属(パラジウム)の表面を走査トンネル顕微鏡で観察すると…

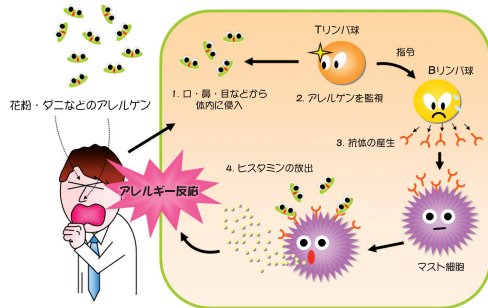


明るい点1個1個がパラジウム原子

現在世界中の研究者が**ナノテクノロジー**の研究を行っていますが、原子が見える走査トンネル顕微鏡は一番重要な実験装置になっています。

血液1滴・30分でアレルギー診断

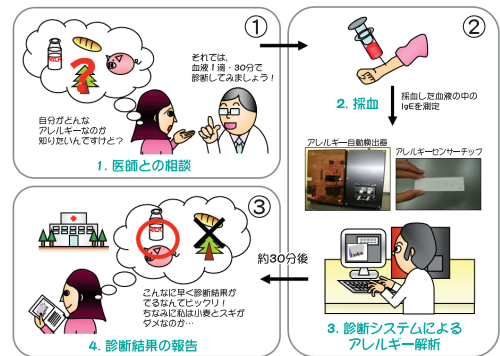
1 体内アレルギー反応のしくみ



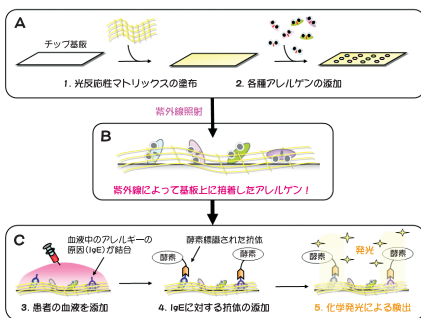
アレルギーとは、スギ花粉、ダニなどに代表されるアレルゲンが体内に侵入して起こる症状です。例えば、体内にアレルゲンが侵入するとTリンパ球という細胞がアレルゲンを認識し、Bリンパ球という細胞にIgE抗体を産生するように指令を出します。そして、そのIgE抗体は、マスト細胞に結合し、体内に侵入したアレルゲンと結合することで、ヒスタミンという生理活性物質が放出されます。その結果、鼻炎、皮膚のかゆみといったアレルギー症状が引き起されるのです。また、アレルギー反応の中には、死に至るケースもあり、アレルギー保有の早期発見こそが、重要な予防策となります。

2 血液1滴・30分でアレルギー診断

現在、患者の血液を調べるアレルギー診断は、病院で行われるのではなく、ほとんど特定の検査機関において行われるため、患者個人への結果報告までに時間がかかります。しかし、私たちの研究室で開発したアレルギーセンサーチップは、血中における多種類のアレルギー源を検出することができるだけでなく、その検出を自動で行う診断システムにより、微量血液(1滴)と測定時間30分という効率的かつ迅速なアレルギー診断の実現に成功しました。



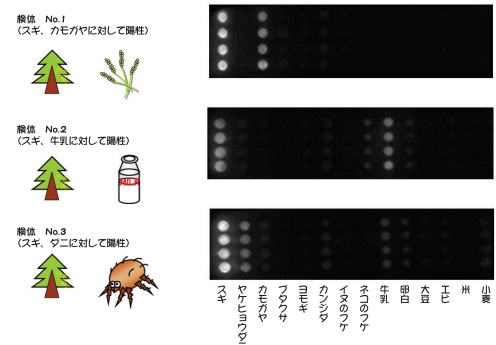
3 アレルギーセンサーチップの作製とアレルギー検出原理



アレルゲンセンサーチップの表面には、光反応性マトリックスが塗布してあります(A-1)。そこにスギ花粉やダニ等に含まれるアレルゲンを添加し(A-2)、紫外線の照射により、各種アレルゲンを固定化します(B)。アレルギーの検出では、患者さんの血液をチップ上に添加(C-3)し、血中に存在するIgEを固定化アレルゲンに結合させます。そして、IgEに対して特異的に結合する抗体(ペルオキシダーゼ標識)の添加(C-4)とペルオキシダーゼ反応による化学発光(C-5)により、各種アレルギーの検出を行います(ペルオキシダーゼ：化学発光反応を促進する酵素)。

4 アレルギー診断システムによる診断結果

アレルギーに関与するIgE抗体が血中に存在している場合、それらに対応するアレルゲンスポット上では化学発光現象が観測されます。その結果、患者さんが何のアレルギーであるかを簡便に判定することができます。今回、アレルギーセンサーチップを利用した診断では(右図)、各患者さんの血液サンプルに対して、それぞれ異なるアレルゲンスポットの発光が観測されました。例えば、検体No.1ではスギ、カモガヤ、検体No.2ではスギ、牛乳、検体No.3ではスギ、ダニに対するアレルギーを保有した患者さんであることが分かります。



ナノサイズの金属に光をあてる

金属はその光沢性から、鏡や装飾品等に用いられ、私たちの日常生活にもなじみがあります。

理科(化学)では、自由電子をもつ金属結晶として学ばれたかと思ひます。私たちはこの金属固有の**自由電子**に着目しました。

ナノサイズの金属を作り、光を照射することで、自由電子を集団的に振動させることができるのです。自由電子をうまくコントロールすれば、金属表面に強い光を生み出したり、白色光から、青や緑や赤などの光を選択的に取り出したりできます。

金属の中でも特に貴金属(金や銀など)は、この自由電子が非常に豊富です。銀は可視光との相性がよいので、私たちはナノサイズの銀を作って様々な研究を行っております。

自由電子がランダムに振動



金属

光の振動数に応じて自由電子も集団的に振動



厚さ数10nmの金属薄膜

ガラス

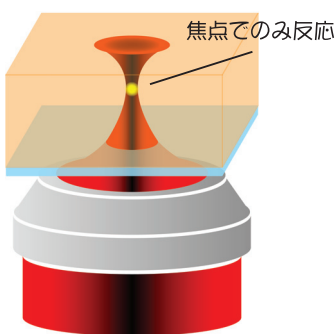
光照明



左写真は映画「パイレーツ・オブ・カリビアン」のワンシーン「アステカの金貨」。
貴金属はその希少価値から貨幣として昔から用いられており、人々を魅了する。

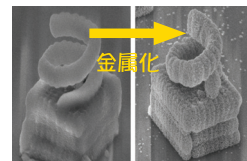
3次元金属ナノ構造を作製する

紫外線をあてると固まる樹脂

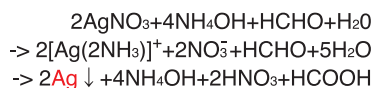


近赤外フェムト秒パルスレーザー

プラスチック 銀

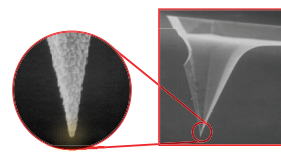


銀鏡反応を利用



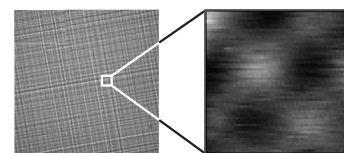
樹脂に高強度のレーザーを集光すると、焦点でのみ光化学反応が起こり、ナノサイズのプラスチックの球ができます。レーザーを3次元的に走査させることで、好きな立体構造をナノサイズで容易に作るすることができます。

金属ナノ探針を使ってナノサイズの物質を観る



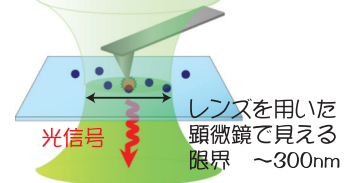
ナノ光源
~30nm

次世代半導体
ひずみシリコンの観察



ひずみシリコン表面

金属ナノ探針



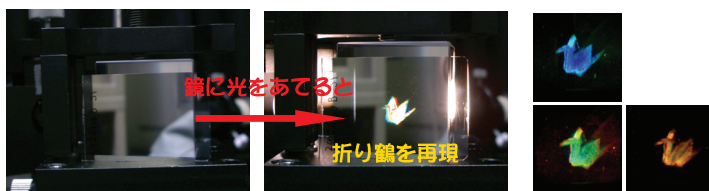
レンズを用いた顕微鏡で見える限界 ~300nm

光照射

銀でできたナノサイズの針に光照射すると、針先にナノサイズの強い光源が生成されます。この針先の光を観察したい物質へ近づけ、光信号を検出することで、従来の光学顕微鏡では観えなかったナノの世界を観えるようになります。

鏡の中に立体像を再現する

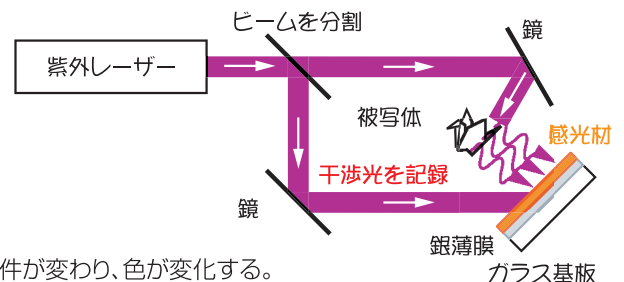
ホログラフィと呼ばれる3次元光再生技術とナノサイズの銀薄膜とを組み合わせることで、鏡の中に被写体を映し出すことができます。



鏡に光をあてる

折り鏡を再現

入射光角度により自由電子の振動条件が変わり、色が変わる。

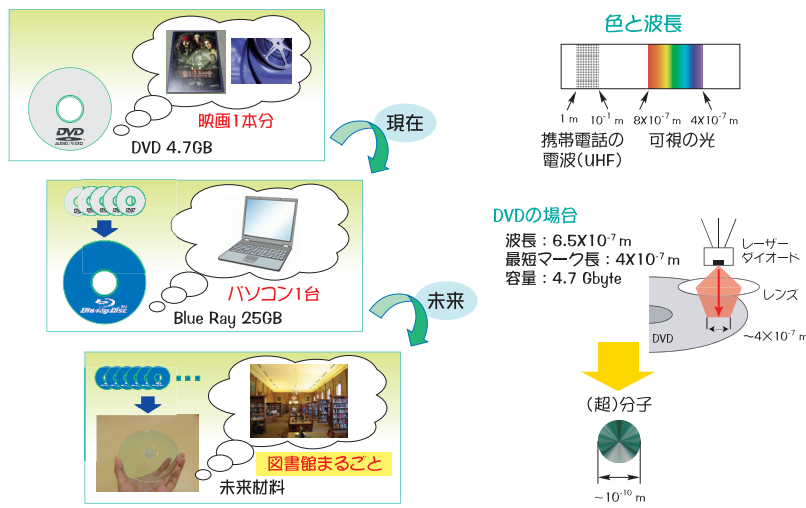


光で情報を書き込める未来材料

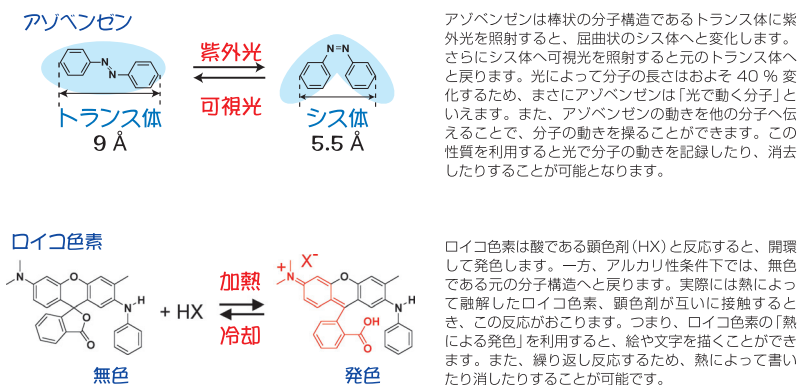
最近の私たちの生活では、携帯電話、インターネット、DVDなどに代表されるように、扱う情報量が急激に増加しています。この状況に対応するために光で情報を書き、光で読む技術が求められています。光を使うことで、「より多く、より速く」情報を処理することができます。私たちは、光で分子の構造を変化させて記録する研究を行っており、特に「超分子」に注目しています。

超分子とは、異なった分子が共有結合以外の結合(配位結合、水素結合など)や比較的弱い相互作用によって集合して生じる、個々の分子のもつ性質とは異なる新しい物性や機能をもつ系のことをいいます。超分子は、熱や光等の外場刺激で分子の構造を劇的に繰り返し変えることができます。この性質を利用すると「超分子を用いた光記録」を実現できます。

光で情報を書いて光で読む



超分子による光記録



光-熱変換による記録

- 光-熱による記録**
- 光のエネルギーを熱に変える
 - 熱で分子が変化すると色が出る
- 遠隔操作(非接触)で高密度な目に見える情報(文字・絵など)の記録と書き換え

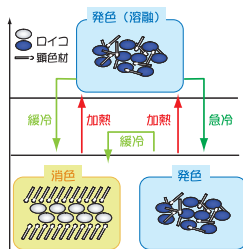


図1. リライト材料(ロイコ染料)の発色・消色原理

図3. 光-熱による記録

光をあてる時間を調整すると書いたり消したりできる

発色・・・高温・短時間(数十ミリ秒)
消色・・・低温・長時間(～1秒)

光-熱による光記録

表面傷がつかない記録ができる
微小領域への印字ができる

光による直接記録

